

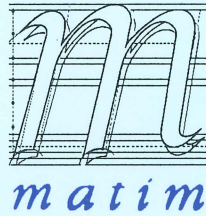
ISSN 1302-9487

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt : 10

Sayı : 1

Mayıs 2008



Makina Mühendisliği Bölümü
ODTÜ - ANKARA

Sahibi

Makina Tasarım ve İmalat Derneği adına Yönetim Kurulu Başkanı
Bilgin KAFTANOĞLU

ODTÜ

Yayın Kurulu

Metin AKKÖK
Can ÇOĞUN
İlhan KONUKSEVEN (Sorumlu Yayın Yönetmeni)

ODTÜ
Gazi Ü
ODTÜ

Danışma Kurulu

M.A. Sahir ARIKAN
Tuna BALKAN
Erhan BUDAK
Serkan DAĞ
Melik DÖLEN
Hüseyin FİLİZ
Necdet GEREN
Mustafa İ. GÖKLER
Erk İNGER
Haydar LİVATYALI
Ferruh ÖZTÜRK
Levend PARNAS
O. Selçuk YAŞI
Yiğit YAZICIOĞLU
Orhan YILDIRIM

ODTÜ
ODTÜ
Sabancı Ü
ODTÜ
ODTÜ
Gaziantep Ü
Çukurova Ü
ODTÜ
BOREN
İTÜ
Uludağ Ü.
ODTÜ
ENVY A.Ş.
ODTÜ
ODTÜ

Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

Makina Tasarım ve İmalat Derneği
Makina Mühendisliği Bölümü, E Blok, No. 101
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06531 ANKARA

Tel : (312) 210 52 12, Faks : (312) 210 12 75

Web : <http://www.me.metu.edu.tr/matim>

e-mail : matim@metu.edu.tr

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 10 Sayı: 1 Mayıs 2008

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

Vol: 10 No: 1 May, 2008

ISSN 1302-9487

TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERNEĞİ'nindir. Yayımlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayımlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, Yayın Kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

ABONE KOŞULLARI

Yıllık abone bedeli 2006 yılı içinde gerçek kişiler için 6 YTL, firma ve kuruluşlar için 30 YTL, öğrenciler için 3. YTL'dir. Abone olmak için aşağıda verilen banka hesabına abone bedelinin yatırılması ve açık adresiniz ile banka makbuzunun adresimize gönderilmesi yeterlidir.

TANITIM KOŞULLARI

Kuruluş ve ürünlerini tanıtmak isteyenler hazırlayacakları tanıtım yazı ve resim taslaklarını Derneğimiz'e göndererek saptanacak bir katkı karşılığında Dergi'de yayımlanmasını sağlayabilirler.

BANKA HESAP NUMARASI

T. İş Bankası, ODTÜ Şubesi
Hesap No: 4229 0235339

DİZGİ

Hülya SEVER

BASKI

ODTÜ Basım İşliği

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Soğuk Dövmede Sürekli Ortamlar Hasar Mekanığı (SOHM) Uygulamaları: Bölüm I- Ekstruzyonda v-
şeklindeki Merkezi Kırık Oluşumunun Modellenmesi 1

C. Soyarslan
A.E. Tekkaya
U. Akyüz

Soğuk Dövmede Sürekli Ortamlar Hasar Mekanığı (SOHM) Uygulamaları: Bölüm II- Ekstruzyonda v-
şeklindeki Merkezi Kırık Oluşumunun Önlenmesi 10

C. Soyarslan
A.E. Tekkaya
U. Akyüz

Yumuşak Doku Mekanik Davranışının Modellenebilmesi için Yerde Canlı (In Vivo) İndentör Deneyleri 18

Ali Tolga Petekkaya
Ergin Tönük

Yerde-Canlı İndentör Deneylerinden Elde Edilen Yumuşak Doku Mekanik Davranışını Modellemek için Sanki-Doğrusal Viskoelastik Malzeme Modelleri 32

Kerem Üsü
Ergin Tönük

Bir Traktör Fabrikasında Hücresel İmalat Uygulaması 41

Mustafa Yurdakul
Kadir Gökhan Güçlü
Yusuf Tansel İç

Sayın Okurlarımız,

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 1986 yılından bu yana özgün araştırmaları yayımlayan hakemli bir dergi olarak süreklilik kazanmıştır. 2001 yılında dergimize ISBN (ISBN1302-9487) numarası verilmiş, TÜBİTAK tarafından ulusal veri tabanına alınmış ve dergi basım adedi artırılarak Türkiye'de daha yaygın dağıtımı sağlanmıştır.

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda katılımlarınızı beklemektedir. Ayrıca kitap tanıtımı, konu taraması ve sanayi kuruluşlarının etkinliklerini içeren yazılara da geçmişte olduğu gibi yer verilmektedir.

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızın katkı ve önerilerini bekleriz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

C. Soyarslan

Atılım Üniversitesi, Üretim
Mühendisliği Bölümü, 06836,
Ankara, Türkiye

Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
06531, Ankara, Türkiye

A.E. Tekkaya

Atılım Üniversitesi, Üretim
Mühendisliği Bölümü, 06836,
Ankara, Türkiye

Dortmund Üniversitesi, Metal
Şekillendirme Teknolojisi ve
Hafif Yapılar Enstitüsü, 44227,
Dortmund, Almanya

U. Akyüz

Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
06531, Ankara, Türkiye

Soğuk Dövmede Sürekli Ortamlar Hasar Mekanizması (SOHM)

Uygulamaları:

Bölüm I-Ekstrüzyonda v-şeklindeki Merkezi Kırık Oluşumunun Modellenmesi

Bu çalışmada, soğuk ileriye çubuk akıtma işleminde görülen iç çatlakların SOHM vasıtası ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek adına hemen hemen-tek yönlü hasar evrimine izin veren Lemaitre tipi bir matematiksel hasar modeli, deformasyon gradyanının çarpmalı faktörizasyonuna dayanan sonlu hiperelastik plastisite ile eşleştirilmiş ve geliştirilen yapı, bir ticari sonlu elemanlar programı olan ABAQUS/Explicit için VUMAT kullanıcı tanımlı malzeme alt-programı olarak uygulanmıştır. Bu alt-program vasıtası ile gerçekleştirilen benzetimlerde 100Cr6 çeliği için tek aşamalı ileriye çubuk akıtma işlemi için merkezi hasar birikimi ve kırık oluşumu incelenmiştir. Gösterilmiştir ki, uygun sürtünme değerleri için deneysel verilerle de uyum gösteren gözlemlere göre, ileriye çubuk akıtma işlemi sırasında, plastik şekillenme bölgesinde meydana gelen pozitif asal gerilmeler malzeme şekillenebilirliğini kayda değer bir şekilde azaltmakta ve nihayetinde v-şeklinde iç kırıklara neden olmaktadır. Ayrıca oluşan kırıkların kuvvet-yer değiştirme eğrileri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

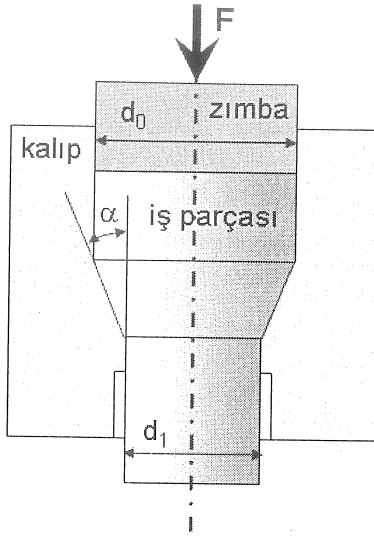
Anahtar Kelimeler: İleriye çubuk akıtma, Sürekli Ortamlar Hasar Mekanizması, Sonlu Elemanlar, V-şeklindeki kırıklar

1. GİRİŞ

Soğuk metal şekillendirme işlemlerinden biri olan ileriye çubuk akıtma işlemi, bir iş parçasının bir zımba vasıtası ile kalıba sürülmesine dayanan bir alan indirgeme yöntemidir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, temel işlem parametreleri arasında alan indirme oranı, $\left[1 - \left(d_0 / d_1\right)^2\right]$, kalıp açısı, α , kalıp-işlem parçası ara yüzü sürtünmesi, işlem sıcaklığı, malzeme sünekliği ve malzeme iç yapısı yer alır. İleriye soğuk çubuk akıtma işlemi oldukça ekonomik olmasının yanı sıra, talaşlı imalatın aksine, pekleşme ile dayanım kazanımı, yorulma dayanımı kazanımı, net şekil ve yüzey kalitesi sağlamaktadır. Metal şekillenebilirliği, yani kırılmaksızın deforme olabilme kabiliyeti, bahsi geçen parametrelerin talihsiz kombinasyonlarında oldukça azalabilmekte

merkezi karakterli v-şeklindeki kırıklar, ya da yüzeysel karakterli yılan derisi şeklindeki kırıklar olarak kendini gösterir.

V-şeklindeki kırıklar merkezi eksene normal olarak konumlanmış içsel ok biçimli kırıklardır. Bu kırıkların oluşumu ürünün yük taşıma kapasitesini oldukça düşürmektedir. Önemli noktalardan biri, kırıkların içsel karakteri nedeniyle standart yüzey muayenesi ile fark edilemez olmalarıdır. Bu nedenle, kusurlu ürünlerin tetkiki tahribatsız ultrasonik muayene yöntemleri gerektirir, ki bu vakit kaybının yanı sıra ekonomik yüke neden olmaktadır. Bu nedenle bu problem 70 seneyi aşkın bir zamandır bir çok araştırmacının ilgisini çekmiştir ve gerek deneysel gerekse analitik ve sayısal yaklaşımlarla kırılma mekanizması çözülmeye çalışılmıştır.



Şekil 1: İleriye çubuk akıtma işlem geometrisi.

Jennison'a ait deneysel çalışmalar 1930'lara dek uzanmaktadır, [1]. Konik kalıplar için, üst sınır teoremi uygulanarak yüzde alan indirgemeye karşı konik kalıp açısı diyagramları, pekleşmesiz plastisite için Avitzur'un analitik çalışmalarında yer almaktadır, [2]. Pekleşmeli modeller için Zimerman ve Avitzur'un çalışmalarına göz atılabilir, [3]. Bu çalışmalarda sunulan diyagramlar pratik uygulamalar açısından işlevsellik sağlasa da, farklı malzeme sünekliği ve sürtünme koşulları için kullanılmaları şüphe götürür. Bu aşamada, fenomenolojik ve mikro-mekanik temelli bir çok farklı malzemenin ve sürtünme modelinin kullanılabilceği, problemlerin farklı sınır koşulları için rahatlıkla çözüleceği sayısal yöntemler, özellikle de sonlu elemanlar metodu

devreye girmektedir. Sonlu elemanlar metodu ile Kırılma Mekanikliği (KM), Mikro-Temelli Hasar Mekanikliği (MTHM) ve Sürekli Ortamlar Hasar Mekanikliği (SOHM) kullanılarak ileriye çubuk akıtmada kırık mekanizmaları incelenmiştir. Kırıkların oluşumunda Düğüm Noktası Ayırma (DNA), Rijitlik Azaltma (RA) ya da Eleman Silme (ES) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin en sık kullanılanı olan ES yönteminde, hasar birikim değeri, kırılmanın olduğu kritik hasar değerinin üzerine çıkan Gauss noktaları sayısal hesaplamalardan elenmekte ve ilgili eleman silinmektedir. Tablo 1, ileriye çubuk akıtma işleminde hasar uygulamaları ile ilgili sayısal çalışmaları tarihsel bir perspektifle derlemektedir.

Tablo 1'de verilen çalışmalar göstermektedir ki, kırıklara neden olan merkezi hasar birikiminin kaynağı şekillenme bölgesinde oluşan çekme tipi hidrostatik gerilmelerdir. Bu sayede mikro-boşluklar büyümekte ve makro-kırıkları oluşturacak şekilde birleşmektedir. Bunun yanı sıra gösterilmiştir ki, yüksek kalıp açıları ile düşük alan indirme oranları merkezi hasar birikimini teşvik etmektedir. Sürtünme, yüzeyde hasar oluşumuna destek olurken merkezi hasar birikimlerinde azalmaya neden olmaktadır. Sürtünme altında oluşan kırıkların frekansında, sürtünmesiz şartlara göre bir azalma olmaktadır. Fakat sürtünmenin uç değerlerinde bu defa içsel kırıklar yerine yüzey kırıkları oluşabilmektedir. Dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de, bu çalışmalarda yüklem hızı pekleşmesi ve termal (ısı) yumuşama etkilerinin karşılıklı olarak birbirlerini ortadan kaldırması kabulüdür.

Tablo 1: İleriye çubuk akıtmada hasar oluşumuna dair sayısal araştırmalar.

#	Referans	Model	Sıcaklık Etkileri	Sürtünme Etkileri	Makro-Kırık	/	Yöntem
1	Aravas [4]	MTHM	-	-	-	/	-
2	Liu and Chung [5]	KM	-	+	-	/	-
3	Giardini et al. [6]	KM	-	+	-	/	-
4	Ceretti et al. [7]	KM	-	+	+	/	ES
5	Lim and Dunne [8]	MTHM	-	-	-	/	-
6	Lee and Hahm [9]	MTHM	-	+	-	/	-
7	Gelin [10]	MTHM	-	-	-	/	-
8	Choi et al. [11]	KM	-	-	-	/	-
9	Ko and Kim [12]	KM	-	+	-	/	-
10	Hambli and Badie-Levet [13]	SOHM	-	+	-	/	-
11	Saanouni et al. [14]	SOHM	-	+	-	/	ES
12	McVeigh and Liu [15]	MTHM	+	+	+	/	ES
13	Soyarslan et al. [16]	SOHM	-	+	+	/	ES

Bu çalışmada, ileriye çubuk akıtma işleminde hasar dağılımı ve kırık oluşum mekanizmaları incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, termodinamiğin bünye değişkenleri teorisi kullanılarak, efektif gerilme kavramı, Kachanov [17], Rabotnov [18], ve gerilme eşdeğerliği prensibine, Lemaitre [19], dayanan hasarla eşleşmiş bir sonlu plastisite modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model ABAQUS/Explicit için bir VUMAT kullanıcı tanımlı malzeme alt-programı olarak uygulanmış ve bu alt-program merkezi hasar birikimi ve kırık oluşumunun modellendiği bir grup benzetimde kullanılmıştır.

2. AÇIK SONLU ELEMANLAR FORMÜLASYONU

Bu makale boyunca şu notasyon kullanılacaktır. \mathbf{a} , \mathbf{b} ve \mathbf{c} 'nin ikinci dereceden tensör olduğu kabul edilirse, tekrarlı indislerde Einstein'ın toplama konvansiyonu kullanılarak, $\mathbf{c} = \mathbf{a} \bullet \mathbf{b}$ işlemi, sonuç bileşenleri $[\mathbf{c}]_{ik} = [\mathbf{a}]_{ij}[\mathbf{b}]_{jk}$ olan başka bir tensör oluşturan bir çarpımı, $d = \mathbf{a} : \mathbf{b}$ ise $d = [\mathbf{a}]_{ij}[\mathbf{b}]_{ij}$ ile birlikte sonucu bir skalar olan bir iç çarpımı ifade eder. $[\circ]$ ile betimlenmiş herhangi bir değişken üzerinde etkiyen referans ve uzaysal gradyan operatörleri, sırası ile $\text{GRAD}[\circ]$ ve $\text{grad}[\circ]$ ile ifade edilmektedir. $[\circ]_{n-1/2}$, $[\circ]_n$, $[\circ]_{n+1/2}$ ve $[\circ]_{n+1}$ sırası ile, $[\circ]$ ile betimlenmiş herhangi bir değişkenin, $t_{n-1/2}$, t_n , $t_{n+1/2}$ ve t_{n+1} zamanlarındaki değerine karşılık gelmektedir. $[\circ]^T$ ve $[\circ]^{-1}$ ile, $[\circ]$ ifadesinin sırası ile transpozesi ve tersi ifade edilmektedir. Ayrıca $\text{tr}(\circ)$ ve $\text{dev}(\circ)$ operatörleri sırası ile $[\circ]$ ifadesinin birinci invariantsını ve deviyatorik kısmını ifade etmektedir.

$\mathbf{F} := \text{GRAD}[\varphi]$ 'nin zaman t 'de referans konfigürasyondan, \mathbf{B}_0 , uzaysal konfigürasyona, \mathbf{B} , doğrusal olmayan deformasyon haritasının, $\varphi(\mathbf{X}, t)$, gradyanı olduğunu kabul edelim. $J = \det[\mathbf{F}]$, \mathbf{F} 'in Jacobian'ı olsun. Lee'nin kinematiki izlenerek, \mathbf{F}^e elastik deformasyon gradyanını, \mathbf{F}^p ise plastik deformasyon gradyanını temsil ederken, her $\mathbf{X} \in \mathbf{B}$ komşuluğunda, ara bir konfigürasyon varsayan yerel bir çarpmalı faktörizasyon, $\mathbf{F} = \mathbf{F}^e \bullet \mathbf{F}^p$, postüle edilsin, Lee[20]. Buna göre $\mathbf{b}^e := \mathbf{F}^e \bullet \mathbf{F}^{e,T}$, güncel konfigürasyonda tanımlı bir elastik sol Cauchy-Green deformasyon tensörü olarak tanımlanacaktır.

$\partial\mathbf{B}$, uzaysal çözüm alanı sınırını ifade ederken, önceden dikte edilmiş yer değiştirmelerdir, $\bar{\varphi}$, ve gerilmeler, $\bar{\mathbf{t}} = \boldsymbol{\sigma} \bullet \mathbf{n}$, sırası ile $\partial\mathbf{B}_\varphi \subset \partial\mathbf{B}$ ve $\partial\mathbf{B}_\sigma \subset \partial\mathbf{B}$, ile verilen sınır kısımlarında etkinliğini göstermektedir ve bu sınırlar için, $\partial\mathbf{B}_\varphi \cup \partial\mathbf{B}_\sigma = \partial\mathbf{B}$, $\partial\mathbf{B}_\varphi \cap \partial\mathbf{B}_\sigma = \emptyset$, ilişkisi geçerlidir. \mathbf{n} uzaysal normal vektörünü ifade etmektedir. Dinamik denge denkleminin zaman t_{n+1} 'deki zayıf formu, sırada verilen sanal iş prensibi ifadesi olarak verilebilir,

$$\underbrace{\int_{\mathbf{B}} \boldsymbol{\sigma}_{n+1} : \text{grad } \eta \, dv}_{\delta \mathcal{P}_{n+1}^{\text{int}}} - \left\{ \underbrace{\int_{\mathbf{B}} \zeta_{n+1} \bullet \eta \, dv}_{\delta \mathcal{P}_{n+1}^{\text{ext}}} + \underbrace{\int_{\partial\mathbf{B}_\sigma} \bar{\mathbf{t}}_{n+1} \bullet \eta \, da}_{\delta \mathcal{P}_{n+1}^{\text{ext}}} \right\} + \underbrace{\int_{\mathbf{B}} \rho \ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \bullet \eta \, dv}_{\delta \mathcal{P}_{n+1}^{\text{kin}}} = 0 \quad (1)$$

Sanal yer değiştirmelerin η ile temsil edildiği yukarıdaki ifadede, $\delta \mathcal{P}^{\text{int}}$, $\delta \mathcal{P}^{\text{ext}}$ ve $\delta \mathcal{P}^{\text{kin}}$ sırası ile sanal iç iş, sanal dış iş ve sanal atalet işini betimler. $\boldsymbol{\sigma}$ Cauchy gerilmelerini gösterirken Kirchhoff tipi gerilmeler $\boldsymbol{\tau} = \det(\mathbf{F})\boldsymbol{\sigma}$ ile gösterilmektedir. Öz kütle ρ tarafından ifade edilmektedir. ζ ve $\ddot{\mathbf{u}}$ sırası ile kütleli kuvvetlerini ve ivmeyi gösterir. \mathbf{F}^{int} , \mathbf{F}^{ext} ve \mathbf{M} 'nin sırası ile iç kuvvetler, dış kuvvetler ve kütle matrisini betimlediği kabul edilerek, \mathbf{B}_e 'nin elemanları,

$\sum_{e=1}^{n_{el}}$ 'nin ise birleştirici operatörü temsil ettiği bir $\mathbf{B} = \sum_{e=1}^{n_{el}} \mathbf{B}_e$ ifadesi ile, uzaysal ayrıklaşma sağlanmasını takiben, sıradaki ifadede verilen ayrı ayrı momentum denklemi türetilebilir,

$$\mathbf{F}^{\text{int}} - \mathbf{F}^{\text{ext}} + \mathbf{M} \bullet \ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{0} \quad (2)$$

Δt_{n+1} ile verilen tipik bir zaman adımı için açık bir zaman entegrasyon yöntemi, sonuç yer değiştirmelerinin elde edilmesi sırada merkezi fark metodunu ortaya çıkarır,

$$\mathbf{u}_{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_n + \Delta t_{n+1} \dot{\mathbf{u}}_{n+1/2} \quad (3)$$

öyle ki,

$$\mathbf{u}_{n+1/2} = \dot{\mathbf{u}}_{n-1/2} + \frac{\Delta t_{n+1} + \Delta t_n}{2} \ddot{\mathbf{u}}_n \quad (4)$$

$$\ddot{u}_n = \mathbf{M}_n^{-1} \cdot [\mathbf{F}_n^{ext} - \mathbf{F}_n^{int}] \quad (5)$$

\mathbf{F}^{int} , \mathbf{F}^{ext} ve \mathbf{M} şu şekilde ifade edilebilir,

$$\mathbf{F}^{int} = \sum_{e=1}^{n_{el}} \left[\int_{B^e} \mathbf{B}^{e,T} \cdot \boldsymbol{\sigma}^e dv^e \right] \quad (6)$$

$$\mathbf{F}^{ext} = \sum_{e=1}^{n_{el}} \left[\int_{B^e} \mathbf{N}^{e,T} \cdot \boldsymbol{\zeta} dv^e + \int_{\partial B_0^e} \mathbf{N}^{e,T} \cdot \bar{\mathbf{t}} da^e \right] \quad (7)$$

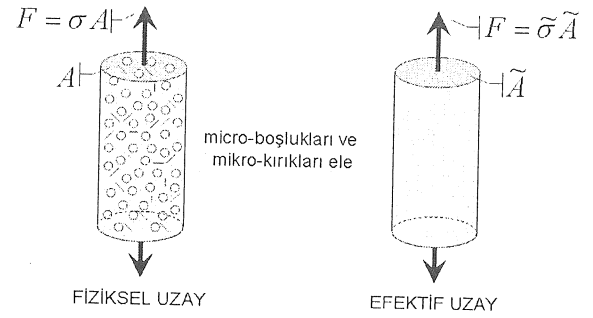
$$\mathbf{M} = \sum_{e=1}^{n_{el}} \left[\int_{B^e} \rho \mathbf{N}^{e,T} \cdot \mathbf{N}^e dv^e \right] \quad (8)$$

Yukarıdaki denklemlerde \mathbf{N}^e ve \mathbf{B}^e sırası ile şekil fonksiyonlarını ve gerinme-yer değiştirme matrisini göstermektedir. Açık sonlu elemanlar yöntemi bellek kullanımı açısından verimli olmasının yanı sıra temas problemlerinin çözüm yöntemleri ve paralel algoritmaların uygulanmasında verimlilik sağlamaktadır. Bunun yanı sıra bu prosedürler kapalı formların yakınsama sorunu çıkardığı ileri süreksizlik içeren problemlerde etkilidir. Kırık oluşum ve ilerleme problemleri bu tip problemlerdendir. Açık yöntemlerin faydalarından biri de teğetsel rijitlik matrisinin hesaplanmasını gerektirmediklerinden, malzeme teğetininde elde edilmesi çok zor hatta imkansız olabilen kompleks malzeme modelleri için kolaylık sağlamalarıdır. Sözü edilen özellikleri kullanıcıları etkilese de, açık yöntemler ancak şarta bağlı stabilite gösterirler ve stabiliteyi seçilen zaman basamağının büyüklüğüne bağlıdır. Buna göre, özellikle statik problemlerin dinamik problemlere benzetimi ile açık yöntemlerle çözümü önemli derecede vakit almaktadır. Bu davranışın iyileştirilmesinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri, atalet etkilerinin makul limitlerde tutulmasına özen gösterirken malzeme özkütlesinin ya da yüklem hızının sentetik olarak artırılmasıdır. Değindiği gibi malzeme tanjantı elde edilmesini gerektirmeyen açık yöntemin uygulamasında tek ihtiyaç, gerilme ve bünye değişkenleri güncelleme algoritmalarının elde edilmesidir. Sıradaki bölümde malzeme modeli ile ilgili detaylar verilmektedir.

3. HASARIN MATEMATİK MODELLENİNİN OLUŞTURULMASI

Termodinamiğin bünye değişkenleri teorisi izlenerek, α ve $D \in [0,1]$ 'nin sırası ile izotrop pekleşme ve hasarı temsil eden gerinme tipi bünye değişkeni olduğunu kabul edelim. Bunlar sırası ile dislokasyon yığıntıları ve mikro-çatlak ve mikro-boşluk yoğunlukları gibi mikro-mekanik işlemlerin fenomenolojik karşılıklarını ifade ederler. Basit bir tek boyutlu gözlem, hasar kavramının geometrik anlamının çözümlenmesine yardımcı olacaktır. Şekil 2 referans alınarak, fiziksel uzay ve efektif uzay

olmak üzere iki işlem uzayı yapılandırılm. Fiziksel uzay, mikro-kırık ve mikro-boşluk etkilerinin yansıtıldığı güncel uzayı temsil ederken, efektif uzay ise, bu etkilerin elimine edildiği bir kurgusal uzaya karşılık gelsin. Bu uzaylarda tanımlı, ilgili düzleme ait alan bileşenleri, sırası ile nominal kesit alanını ifade eden A , ve etkin kesit alanını ifade eden \tilde{A} , olacaktır. Bu tanımlar baz alınarak hasar değişkeni $D := A_D / A$ şeklinde yazılabilir. Bu ifadede $A_D = A - \tilde{A}$, kesit alanı içerisindeki hasarlı alanı göstermektedir.



Şekil 2: Efektif gerilme kavramı.

Efektif gerilme kavramı bu tanımlardan filizlenir. Buna göre, hasarsız malzeme matrisinde, etkin alan üzerinde tanımlanan gerilme, efektif Cauchy gerilmesi, $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$, olarak tanımlanırken, bu gerilmenin homojenize edilmiş şekline tekabül eden nominal Cauchy gerilmesi, $\boldsymbol{\sigma}$, ise mikro-kırık ve mikro-boşlukları barındıran nominal kesit alanında etkilidir. Efektif ve nominal gerilmeler arasındaki ilişki matematiksel olarak şu şekilde verilebilir,

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma} / [1 - D] \quad (9)$$

Gerilme tipi ve gerinme tipi bünye değişkenleri arasındaki kanonik bünye denklemlerinin etkin gerilme tipi değişkenler kullanılması halinde şekillerini koruması anlamına gelen gerinme denklik prensibi kullanılarak, elastisite ve hasar arasında bünye eşleşmesi kabulü ile, efektif Kirchhoff gerilmesi, $\tilde{\boldsymbol{\tau}} = \mathcal{J} \tilde{\boldsymbol{\sigma}}$, için elastik logaritmik gerinmeler, $\boldsymbol{\varepsilon}^e$, cinsinden doğrusal olan şu ilişki elde edilebilir,

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = H \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}^e) \mathbf{1} + 2G \text{dev}(\boldsymbol{\varepsilon}^e) \quad (10)$$

Bu denklemde H ve G sırası ile sıkıştırılabilirlik ve kesme modülünü ifade etmektedir. İzotrop plastik pekleşme için bileşke doğrusal ve üssel bir form seçilirse, sıradaki ifadede verilen bir izotrop pekleşme gerilme tipi bünye değişkeni, q , tanımı elde edilir,

$$q = -K\alpha - [\tau_\infty - \tau_0][1 - \exp(-\delta\alpha)] \quad (11)$$

Bu ifadede K , τ_0 , τ_∞ ve δ sırası ile doğrusal pekleşme katsayısı, ilk akma gerilmesi, doyma gerilmesi ve pekleşme üstel katsayısını ifade etmektedir. Elastik gerinme enerjisi yoğunluğunun değişim hızı şeklindeki, Lemaitre tipi bir hasar eşlenik değişkeni, Y , için şu ifade geçerlidir,

$$Y = \frac{1}{2} H \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}^e)^2 + G \text{dev}(\boldsymbol{\varepsilon}^e) : \text{dev}(\boldsymbol{\varepsilon}^e) \quad (12)$$

Evrim denklemlerinin türetilmesi klasik normalite kuralını kullanır. Buna göre, $\dot{\gamma}$ plastik çarpanı temsil ederken, von Mises tipi bir plastik akma potansiyeli ve Lemaitre tipi bir hasar dağılım potansiyeli ile birlikte sıradaki hız denklemleri türetilir,

$$\dot{\mathbf{b}}^e = -2 \frac{\dot{\gamma}}{[1-D]} \mathbf{N} \bullet \mathbf{b}^e \quad (13)$$

$$\dot{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\gamma} \quad (14)$$

$$\dot{D} = -a \frac{\dot{\gamma}}{[1-D]} Y \quad (15)$$

burada $\dot{\mathbf{b}}^e$, \mathbf{b}^e 'nin objektif Oldroyd hızını temsil eder. $\mathbf{N} = \text{dev}(\tilde{\boldsymbol{\tau}}) / \|\text{dev}(\tilde{\boldsymbol{\tau}})\|$ plastik akma doğrultusunu ifade eder, ki $\|\cdot\|$, $[\cdot]$ 'nin Euclid normunu temsil etmektedir. a , hasar parametresini göstermektedir.

Mikro-mekanik gözlemler, çekme tipi üç-eksenli gerilme alanlarının, metalik malzemelerin şekillenebilirliğini büyük ölçüde düşürmekte olduğunu ve bu davranışın basma tipi alanlar için geçerli olmadığını göstermektedir. Bu gözlem göz önüne alınarak, çekme ve basma tipi gerilme durumlarındaki hasar evrimini ayırt eden gelişmiş bir hasar eşlenik değişkeni, Y^+ , türetilir. Bunun için basit fakat etkili bir yöntem, hasar eşlenik değişkenini asal efektif gerilmeler cinsinden ifade edilirken ve çekme ve basma tipi gerilme kaynaklı kısımların ayırt edilmesidir. Bunu takiben basma tipi asal efektif gerilmelere ait kısım bir kırık kapanma katsayısı, $h \in [0,1]$, ile orantılanabilir. Bu katsayı hemen hemen-tek yönlü hasar evrimine izin verecektir. Buna göre Y^+ şu şekilde tanımlanır,

$$Y^+ = \frac{1+\nu}{2E} \left[\langle \tilde{\tau}_1 \rangle^2 + \langle \tilde{\tau}_2 \rangle^2 + \langle \tilde{\tau}_3 \rangle^2 \right] - \frac{9\nu}{2E} \langle \bar{p} \rangle^2 + \frac{h(1+\nu)}{2E} \left[\langle -\tilde{\tau}_1 \rangle^2 + \langle -\tilde{\tau}_2 \rangle^2 + \langle -\tilde{\tau}_3 \rangle^2 \right] - \frac{9h\nu}{2E} \langle -\bar{p} \rangle^2 \quad (16)$$

Bu tip bir yaklaşım [21]'de önerilmiştir. Bu denklemde $\langle \cdot \rangle$ Macauley parantezini ifade edip $\langle \cdot \rangle = 1/2 [[\cdot] + |\cdot|]$ geçerlidir. Dikkat edilirse $h = 0$, sadece çekme gerilmelerinin etkisini dikkate alırken, konvansiyonel Lemaitre modeli $h = 1$ için geçerlidir.

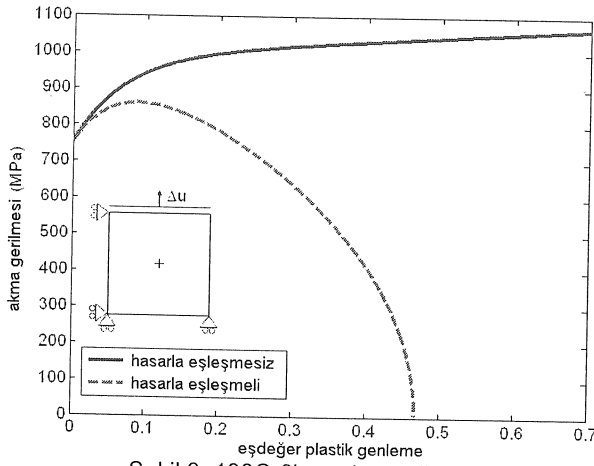
4. V- ŞEKLİNDEKİ MERKEZİ KIRIKLARIN BENZETİMİ

Geliştirilen bu çatı ABAQUS/Explicit için VUMAT kullanıcı tanımlı malzeme alt-programı şeklinde uygulanmıştır. Bu alt-program vasıtası ile tek pasolu aksenal simetrik ileriye çubuk akıtma işleminde hasar birikimi ve buna müteakip kırık oluşumu ve ilerlemesine dair benzetimler koşturulmuştur. Sonlu gerinmeli bir açık çözüm yöntemi takip edilmiştir. Benzetimlerde 4 düğüm noktalı aksenal simetrik dört kenarlı CAX4R elemanları kullanılmıştır. Bu elemanlar bileşke rijitlik ve viskozite hourglass kontrollü indirgenmiş entegrasyonlu elemanlardır. Eleman kenar büyüklükleri 0.2 mm olarak belirlenmiş ve hız kontrollü bir yükleme uygulanmıştır. Arayüzlerdeki sürtünme için Coulomb sürtünme modeli kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı μ ile ifade edilmiştir. Hesaplamalarda çift kesinlik kullanılıp ikinci dereceden hassaslık ve çarpılma kontrolü uygulanmıştır. Yapılan kapsamlı benzetimler, sürtünme, kırık kapanma katsayısı, karşı basınç uygulaması, kalıp açısı, alan indirim oranı ve malzeme pekleşmesinin, hasar birikimi, kırık oluşumu, kırık şekli ve kırık frekansına olan etkisini incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Problem geometrisi ve sınır koşulları Şekil 1'de verilmiştir. Benzetimlerde aksi belirtilmediği takdirde Şekil 1 referans alınarak belirlenen şu işlem parametreleri kullanılmıştır.

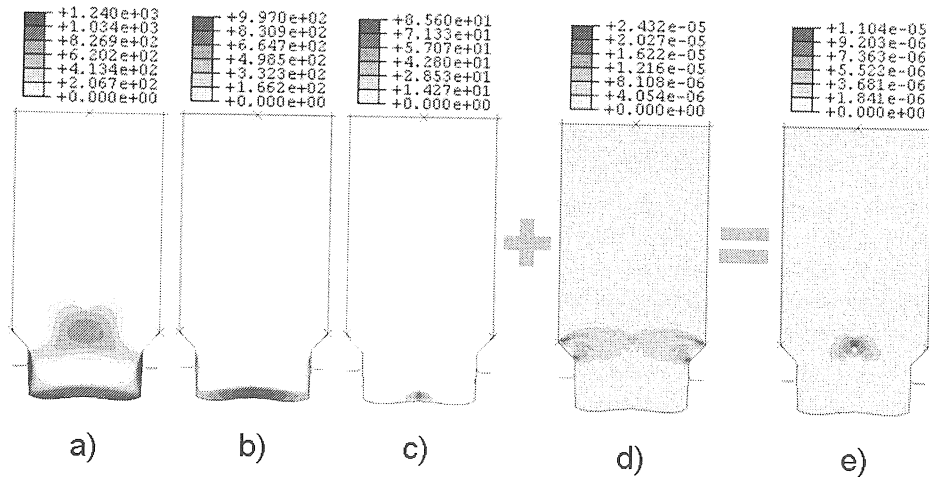
Tablo 2: İşlem geometrisine ait parametreler.

Parametre	Birim	Büyükölç
Kalıp açısı, α	derece	45
İşlem öncesi çap, d_0	mm	19.1
İşlem sonrası çap, d_1	mm	15.0
Çap oranı, d_0/d_1	-	1.27

Benzetimlerde sürtünmesiz basma testi ve deneysel ileriye çubuk akıtma sonuçlarının mevcut olduğu 100Cr6 malzemesi kullanılmıştır. Tablo 3.'te verilen malzeme plastisite parametreleri bahsedilen basma testlerinden hesaplanmıştır. Malzeme mekanik karakterizasyonu için sürtünmesiz basma testinde, basma gerilmeleri altında kesme dekohezyonu ile boşluk oluşumu göz ardı edilirse, tam kırık kapanma koşulu altında hasarın plastisite parametrelerinin bulunması üzerinde bir etki sahibi olmadığı kabulü yapılabilir. Tek Gauss noktasına sahip tek bir sonlu elemanın, düzlem gerinme koşullarında yüklenmesi ile elde edilmiş hasarlı ve hasarsız akma eğrileri Şekil 3'te verilmiştir. Kullanılan model, hasar birikimi eşlenik plastik gerinme eğrisi için yukarı doğru-konkav bir yapıya sahiptir. Kırık için gerekli kritik kırılma hasar değeri, $D_{cr} = 0.27$ olarak seçilmiştir.



Şekil 3: 100Cr6'nın akma eğrisi.



Şekil 4: İlk kırık oluşumu öncesi bünye değişkenleri dağılımları, a) Maksimum, b) Orta, c) Minimum asal gerilmelerin pozitif kısımları, d) eşdeğer plastik gerinme hızı, e) hasar hızı, $\mu = 0$.

Şekil 4 sürtünmesiz ileriye çubuk akıtma benzetimlerine aittir. İlk aşamada sürtünmenin göz ardı edilmesinin temel nedeni sürtünmeden kaynaklanabilecek etkileri engellemek ve sadece hasar mekanizmasına konsantre olmaktır. Kırık kapanma parametresi $h = 0$ olarak alınmıştır ve bu sayede kırık mekanizmasına sadece çekme asal gerilmelerinin katkısı olduğu varsayılmıştır. Hasar mekanizmasının açıklanması adına, Şekil 4.a, b ve c'de hasar evrimine katkıda bulunan asal gerilmelerin pozitif kısımlarına ait dağılımlar verilmiştir. Görülmektedir ki, kalıp çıkış bölgesinde de yüksek derecede kalıntı çekme gerilmeleri olmasına rağmen hasar birikimi, eşdeğer plastik gerinme evriminin azami çekme tipi asal gerilmelerle bulunduğu alan indirim bölgesinin merkezinde gözlenmektedir. Bu gözlem hasar evriminin pozitif üç-eksenli gerilme durumunda artması şeklindeki deneysel literatür önermeleri ile uyumludur.

Tablo 3: 100Cr6 malzeme parametreleri.

Parametre	Birim	Büyüklik
H	GPa	175.0
G	GPa	80.8
K	MPa	115.1
τ_0	MPa	987.9
τ_∞	MPa	752.0
δ	-	14.3
a	-	0.3

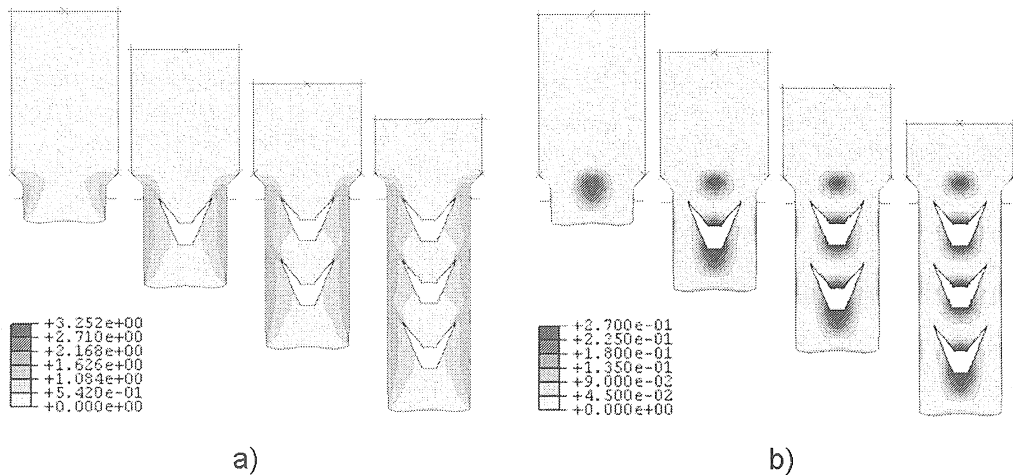
Benzetimlerde kırık oluşumu, kritik hasar değerini 0.27 olarak almakla ve ES yöntemi uygulanarak sağlanabilir. Bu sayede, ilgili elemana ait Gauss noktasında hasar değeri 0.27'yi geçmesi halinde tek bir Gauss noktasına sahip eleman, hesaplama bloğundan çıkarılmakta, bu sayede silinme etkisi yakalanmakta ve elemandan boşalan alan kırık olarak değerlendirilmektedir. Sonlu elemanlar ağından elemanın iptali yapısal kütle matrisi ve iç kuvvet vektörü üzerinde etkilere sahip olacaktır, ki silinmiş elemanın hesaplama bloğundan çıkarılması ile ilgili eleman kütle matrisi ve iç kuvvet vektörü yapısal seviyede toplanmayacaktır. Bu durum, dinamik problemin çözümünde stabilite problemleri çıkarabileceğinden adaptif ağ yapısı ve silinen eleman boyutlarının makul boyutlarda olması ile daha yumuşak çözüm geçişleri sağlanabilir. Şekil 5.a ve b'de, sırası ile, kırıklı işlem boyunca oluşan eşdeğer plastik gerinme ve hasar dağılımları verilmektedir. Şekil 5.a göstermektedir ki eşdeğer plastik gerinmeler merkezi kırık oluşumundan etkilenmektedir. Özellikle oluşmuş kırık uçlarında plastik akma konsantrasyonları gözlenebilir. Şekil 5.b kırıkların periyodik oluşumuna ışık tutar niteliktedir. Buna göre maksimum hasar birikimi serbest kırık yüzlerinde mevcuttur ve kırık oluşumunu sağlamaktadır. Kırık oluşumu ile yaratılan serbest yüzeyler gerilmeden bağımsız olacaklarından kırığın merkezde tekrar birikimi için gerekli gerilme ve plastik akma alanlarının temini zaman almaktadır. Bu zaman kırık süresizliğini sağlarken kırık frekansını da belirler.

Aynı benzetim için kırıksız sonuçların elde edilmesi, kritik hasar değerinin, analizlerde erişilmeyen $D_{cr} = 1$ değeri alınması ile gerçekleştirilebilir. Kırıklı ve kırıksız benzetim karşılaştırmaları oldukça öğreticidir. Şekil 6 kırıklı ve kırıksız benzetime ait zımba kuvveti-zımba yer

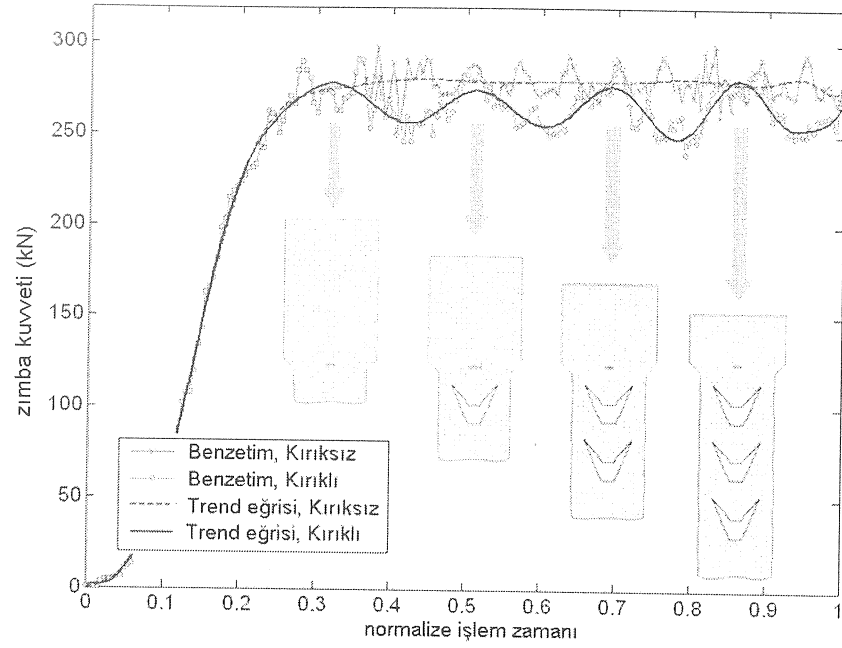
değiştirme eğrilerini vermektedir. Bu eğrilerin karşılaştırılması göstermektedir ki, kırıksız analize ait eğri daimi rejimde sabit bir değerde kalırken kırıklı analize ait eğri dalgalanmalı bir davranış göstermektedir. Gözlemlenmektedir ki, dalgalanma frekansı kırık oluşum frekansı ile uyumludur. Dalgalanma mekanizması, şekilde de gösterildiği gibi, her makro-kırık oluşumundan itibaren düşme trendi gösteren zımba yüküne dayanır. Belli bir zaman aralığının ardından yük kapasitesi artmakta ve yine dalgalanmaya ait maksimum yük seviyesi yakalanmaktadır. Kırıksız benzetimin sonucuna bakıldığında ise bu trend yerine, sürtünmesiz koşullar nedeni ile sabit bir değer yakalandığı tipik bir daimi rejim zımba yükü- zımba yer değiştirme eğrisi gözlenir.

ES yöntemi, kütle korunumu ilkesini ihlal etmesi gerekçesi ile eleştirilmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen ES yöntemi uygulaması ile silinen elemanların kapsamı, Şekil 7'de deforme olmaması sonlu elemanlar ağında gösterilmiştir. Bu şekilde anlaşılmaktadır ki, kırık oluşumunda gözlenen boşluk temel olarak silinen elemanlardan değil, silinen elemanlarla oluşan serbest yüzeylerin, yeniden tanzim olan mekanik yükleme koşulları altında aralanmasından kaynaklanmaktadır. Buna göre, özellikle ES yönteminin uygulamada sağladığı kolaylıklar göz önüne alındığında, bu kütle korunumu ihlalinin göz ardı edilebilir boyutta olduğu sonucuna varılabilir. Bunun yanı sıra, silinen elemanlara ait hacim yüzdesi, maksimum hasar görmüş bölgelerde minimum eleman boyutu kullanmak kaydı ile, adaptif ağ yapısı yöntemi kullanılarak en iyileme yapılabilir.

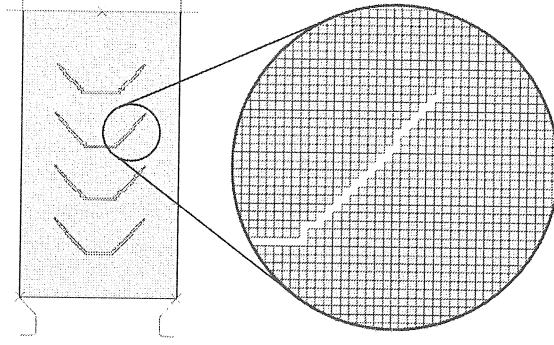
Şekil 8'de gösterilmektedir ki, deneysel verilerle en iyi uyum gösteren benzetim, sürtünme koşulunun $\mu = 0.04$ olarak alındığı benzetimdir.



Şekil 5: Çeşitli işlem aşamalarındaki bünye değişkenleri dağılımları, a) eşdeğer plastik gerinme, b) hasar, $\mu = 0$.

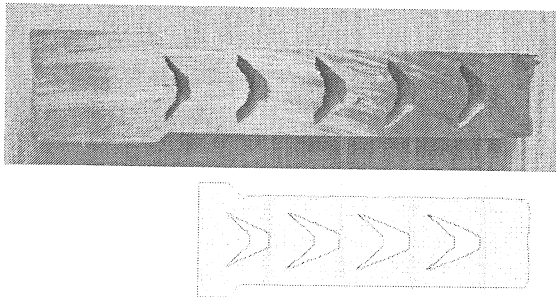


Şekil 6: Kırıklı ve kırksız benzetimlerde elde edilen zımba kuvveti-normalize işlem zamanı eğrileri, $\mu = 0$.



Şekil 7: Silinen elemanların deforme olmamış sonlu elemanlar ağındaki dağılımı, $\mu = 0$.

Görülmektedir ki, benzetimde ve deneyde elde edilen kırık periyodları uyum içindedir, ve bu da, sunulan hasar mekanizması yaklaşımının doğruluğuna işaret etmektedir.



Şekil 8: Deneysel kırık verileri ile benzetim verilerinin karşılaştırılması, $\mu = 0.04$.

5. SONUÇ

İleriye çubuk akıtma işleminde oluşan merkezi hasar birikimi ve kırık oluşumunun modellenmesini içeren bir çalışma sunulmuştur. Bu amacın gerçekleştirilmesinde, hemen hemen-tek yönlü bir Lemaitre varyantı SOHM modeli ile sonlu gerinmeli hiperelastik plastisite eşleştirilmiştir. Geliştirilen model ABAQUS/Explicit için bir VUMAT kullanıcı alt-programı şeklinde uygulanmış ve 100Cr6 malzemesi ile tek pasolu ekstrüzyon için bir grup benzetimde kullanılmıştır. Benzetimlerde periyodik kırıklar elde edilmiş ve uygun sürtünme koşullarında deneysel verilerle uyum sağlayan kırık desenleri sağlanmıştır.

**CONTINUUM DAMAGE MECHANICS (CDM)
APPLICATIONS IN COLD FORMING: PART I-
MODELING CHEVRON CRACK FORMATION IN
EXTRUSION**

In this study, investigation of internal cracks observed in direct forward extrusion processes by means of CDM is aimed. In order to realize this aim, a Lemaitre type damage model giving account for unilateral damage evolution is coupled with finite plasticity based on the multiplicative decomposition of the deformation gradient and the developed framework is implemented as VUMAT user defined material subroutine for ABAQUS/Explicit. With the simulations utilizing this subroutine, macro-crack formation and propagation in single step forward extrusion of 100Cr6 is investigated. Depending on the results which are in correlation with the experimental outputs for certain friction levels, it is shown that, during the extrusion process, positive hydrostatic stresses occurring in plastic deformation zone considerably reduces the formability of the material and finally causes chevron cracks. In addition, the effect of crack formation on the force-displacement curves are also investigated.

Keywords: Forward extrusion, Continuum Damage Mechanics, Finite Elements, Chevron cracks

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, MISAG JULICH 04 kodu ile, TÜBİTAK ile Almanya Jülich Araştırma Merkezi Arasındaki İşbirliği Çerçevesinde Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar bu desteğe teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Jennison, H.C.: Certain types of defects in copper wire caused by improper dies and drawing practice, in : Proc Inst Metal Div AIME, 1930, 89.
2. Avitzur, B.: Analysis of central bursting defects in extrusion and wire drawing, J. Mech. Phys. Solids, 1968, 90, 79-91.
3. Zimmerman, Z., Avitzur, B.: Analysis of central bursting defects in extrusion and wire drawing, 1970, J. Eng. Ind. 90, 135-145.
4. Aravas, N.: The analysis of void growth that leads to central bursts during extrusion. J Eng for Ind, 1986, 34, 55-79.
5. Liu, T. S., Chung, N., L.: Extrusion analysis and workability prediction using finite element method, Computers and Structures., 1990, 34, 369-377.
6. Giardini, C., Ceretti, E., Maccarini, G.: Formability in extrusion forging: the influence of die geometry and friction conditions, Journal

- of Materials Processing Technology, 1995, 54, 302-308.
7. Ceretti, E., Taupin, E., Altan, T.: Simulation of metal flow and fracture applications in orthogonal cutting, blanking, and cold extrusion, Annals of the CIRP, 1997, 46, 187-190.
8. Lim, L. G., Dunne, F. P. E.: Modelling central bursting in the extrusion of particulate reinforced metal matrix composite materials, Int. J. Mach. Tools Manufact., 1997, 37, 901-915.
9. Lee, Y., Hahm, S.: Mechanical property changes in drawing/extrusion of hardening viscoplastic materials with damage, Int. J. Mech. Sci., 1997, 39, 565-573.
10. Gelin, J. C., Modelling of damage in metal forming simulations, J. Mater. Proc. Technol., 1998, 80-81, 24-32.
11. Choi, S., Lee, Y., Oh, H.: Ductile fracture in axisymmetric extrusion, J. Mater. Proc. Technol., 1998, 74, 263-267.
12. Ko, D., Kim, B.: The prediction of central burst defects in extrusion and wire drawing, J. Mater. Proc. Technol., 2000, 102, 19-24.
13. Hambli, R., Badie-Levet, D.: Damage and fracture simulation during the extrusion process, Comput. Meth. Appl. Mecha. Eng., 2000, 186, 109-120.
14. Saanouni, K., Mariage, J. F., Cherout, A., Lestriez, P.: Numerical prediction of discontinuous central bursting in axisymmetric forward extrusion by continuum damage mechanics, Computers and Structures, 2004, 82, 2309-2332.
15. McVeigh, C., Liu, W. K.: Prediction of central bursting during axisymmetric cold extrusion of a metal alloy containing particles, Int J Solids and Structures, 2006, 43, 3087-3105.
16. Soyarslan, C., Tekkaya, A. E., Akyuz, U.: Applications of Continuum Damage Mechanics in discontinuous crack formation: Forward extrusion chevron predictions, Z Angew Math Mech, 2008, 88, 436-453.
17. Kachanov, L.M.: Time of the rupture process under creep conditions, Izv Akad Nauk SSR, 1958, 8, 26-31.
18. Rabotnov, Y.: Creep rupture, in: M. Hetenyi and W. Vincenti, eds., Applied Mechanics. Proceedings of the 12th Int Congress of Applied Mech, Springer-Verlag, Berlin, 1968, 342-320.
19. Lemaitre, J.: Evaluation of dissipation and damage in metals, in: Proceedings of I.C.M. 1, Kyoto, Japan., 1971.
20. Lee, E.H.: Elasto-plastic deformation at finite strains, ASME J Applied Mechanics, 1969, 36, 1-6.
21. Ladeveze, P., Lemaitre, J.: Damage effective stress in quasi-unilateral conditions, IUTAMCongress, Lyngby (Denemark), 1984.

C. Soyarslan
Atılım Üniversitesi, Üretim
Mühendisliği Bölümü, 06836,
Ankara, Türkiye
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
06531, Ankara, Türkiye

A.E. Tekkaya
Atılım Üniversitesi, Üretim
Mühendisliği Bölümü, 06836,
Ankara, Türkiye
Dortmund Üniversitesi, Metal
Şekillendirme Teknolojisi ve
Hafif Yapılar Enstitüsü, 44227,
Dortmund, Almanya

U. Akyüz
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü,
06531, Ankara, Türkiye

Soğuk Dövmede Sürekli Ortamlar Hasar Mekaniği (SOHM)

Uygulamaları:

Bölüm II-Ekstrüzyonda v-şeklindeki Merkezi Kırık Oluşumunun Önlenmesi

Çalışmanın bu kısmında, soğuk ileriye çubuk akıtma işleminde görülen merkezi kırıkların, uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi ile önlenmesine yönelik, SOHM'ne dayanan sayısal çalışmalara yer verilmiştir. Kırık kapanma katsayısı, pekleşme üstel fonksiyon katsayısı, sürtünme, kalıp açısı ve alan indirim oranı, uygulanan ters basınç değeri gibi parametrelerin merkezi hasar birikimine tesiri, kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Gösterilmiştir ki, kalıp açısı-alan indirim oranı uzayını tarayan bir grup sayısal analizle, işlemin hatasız gerçekleşeceği sınır geometri değerlerinin ekonomik olarak temini mümkündür. Önerilen sayısal yöntemin çekici yönlerinden biri de, farklı işlem koşullarını aynı sistematik içerisinde kapsayabilecek genellikte olmasıdır. Buna örnek olarak işlem tasarımına eklenen ters basınç uygulamalarının hasar birikimine etkisi sayısal olarak modellenmiş, uygun karşı basınç değerlerinde iç kırıkların engellenebileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İleriye çubuk akıtma, Sürekli Ortamlar Hasar Mekaniği, Sonlu elemanlar, V-şeklindeki Kırıklar

1. GİRİŞ

Ekstrüzyonda v-şeklindeki merkezi kırıklara ait oluşum mekanizması, bu çalışmanın birinci kısmında, sürekli ortamlar hasar mekaniği yaklaşımı ile çözümlenmiş ve geliştirilen matematiksel model 100Cr6 çeliğinin tek basamaklı ekstrüzyonunda meydana gelen iç çatlakların benzetiminde başarı ile kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmını teşkil eden bu makalede, ekstrüzyonda v-şeklindeki merkezi kırıkların önlenmesine yönelik sayısal çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmanın temel motivasyonunu, halihazırda üretim sektöründe pratik bir araç olarak kullanılan ve Zimerman ve Avitzur'un, [1,2], çalışmalarına dayanan, alan indirgeme oranı ve konik kalıp açısı düzleminde ifade edilen kırıksız ekstrüzyon eğrilerinin yetersizliği oluşturmaktadır. Bu eğriler işlevsel de olsalar, çözümlenmeleri üst sınır teoremine dayanmakta ve farklı işlem parametrelerindeki olası değişiklikleri göz ardı etmektedirler. Oysa ki, halihazırdaki çalışmanın merkezini teşkil eden sürekli ortamlar hasar mekaniği kullanılarak, transfer edilebilir uygun malzeme parametrelerinin teminini takiben, gerçekleştirilecek sayısal çözümlenmelerle birçok parametrenin işlem

üzerindeki etkisi ekonomik ve güvenilir olarak incelenebilir. Etkisi incelenecek parametreler, alan indirme oranı, $[1 - (d_0 / d_1)^2]$, kalıp açısı, α , kalıp-işlem parçası arayüzü sürtünmesi, işlem sıcaklığı, malzeme sünekliği ile sınırlı kalmamakta, konik kalıp harici kalıpların kullanımı ve iş parçası ucuna ters basınç uygulamaları gibi işlem varyantlarının merkezi hasar birikimine tesirleri de aynı sistematik içerisinde kolaylıkla çözümlenebilmektedir.

Çalışmanın takip eden bölümünde, malzeme sünekliği, kırık kapanma katsayısı gibi malzeme parametrelerinin yanı sıra iş parçası-kalıp sürtünmesinin hasar dağılımı ve kırık oluşumuna etkisi incelenmiştir. Ayrıca, alan indirme oranı-konik kalıp açısı düzleminde kırıklı ve kırıksız alanları ayıran, Avitzur ve Zimerman eğrilerine benzer bir eğrinin sayısal olarak temin edilmesine yer verilmiştir. Takip eden bölümde, işlem tasarımının, geometri değiştirilmeksizin, ters basınç uygulaması ile, merkezi hasar birikimini azaltacak ve merkezi kırıkların oluşumunu engelleyecek şekilde geliştirilebileceğine dair sayısal bulgular

sunulmuştur. Son olarak, sonuç bölümünde çalışma ve değerlendirmeler özetlenmiştir.

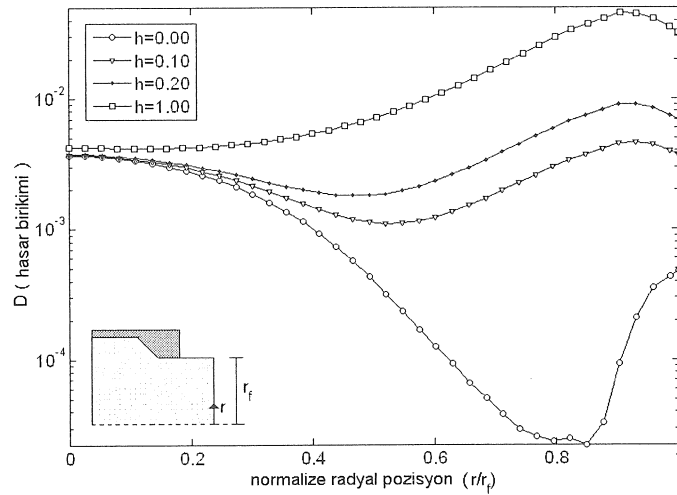
Uygulamaların bütününde sunulan benzetimlerde kullanılan malzeme parametreleri, işlem geometrisi ve sonlu elemanlar modeline ait detaylar, aksi belirtilmedikçe, bu çalışmanın ilk kısmını teşkil eden makaledekilerle aynıdır.

2. FARKLI İŞLEM PARAMETRELERİNİN HASARA ETKİSİ

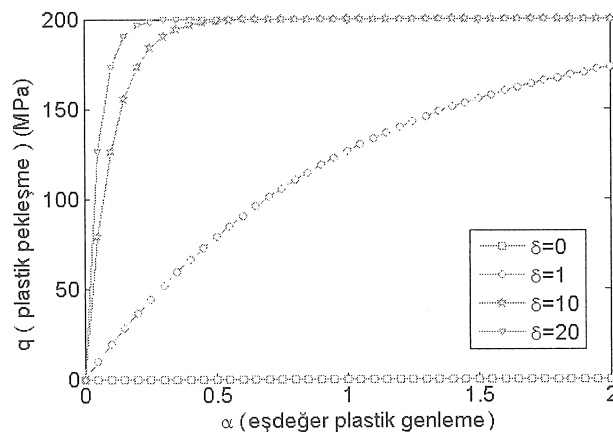
İlk olarak, kırık kapanma parametresinin hasar birikimine olan etkisini ölçmek adına 0.4 mm'lik elemanlardan oluşan bir ağ için sürtünmesiz yüzey koşullarında $h = 0$, $h = 0.1$, $h = 0.2$ ve $h = 1$ için bir grup analiz yapılmıştır. Elde edilen hasar birikimlerinin durağan değerlerine ait radyal dağılım eğrileri logaritmik eksenle Şekil 1'de verilmektedir. Bu benzetimlerde, hasar parametresi, $a = 0.003$, olarak kullanılmıştır, ki bir önceki

analiz değerlerine göre hasar birikimleri oldukça aşağı çekilmiştir. İleriye çubuk akıtmada, kırık kapanma parametresinin etkisinin baskınlığı burada açığa çıkmaktadır. Kırık kapanma parametresinin 0 alındığı koşulda merkezi hasar değeri baskın gelirken, bu değer 1 olduğu durumda yüzey hasar birikimi daha yüksektir. Oluşabilecek muhtelif kırık bölgeleri açısından değerlendirildiğinde, bu iki koşulun sırası ile merkezi ve yüzeysel kırıklara tekabül edeceği açıktır.

Malzemenin pekleşme trendinin hasar oluşumuna etkisini gözlemek adına, izotrop pekleşmeli plastisite fonksiyonu için kısmen basitleştirilmiş, doğrusal pekleşmesiz bir üssel doyma fonksiyonu varsayılmıştır. Akma gerilmesi 750 MPa ve doyma gerilmesi ise 950 MPa olarak alınmıştır. Farklı doyma üssel parametreleri, farklı hızlarda plastik pekleşme sağlamaktadır ve kullanılan parametrelere karşı oluşan pekleşme eğrileri Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 1: Kırık kapanma parametresinin radyal hasar dağılımına etkisi, $\mu = 0$.

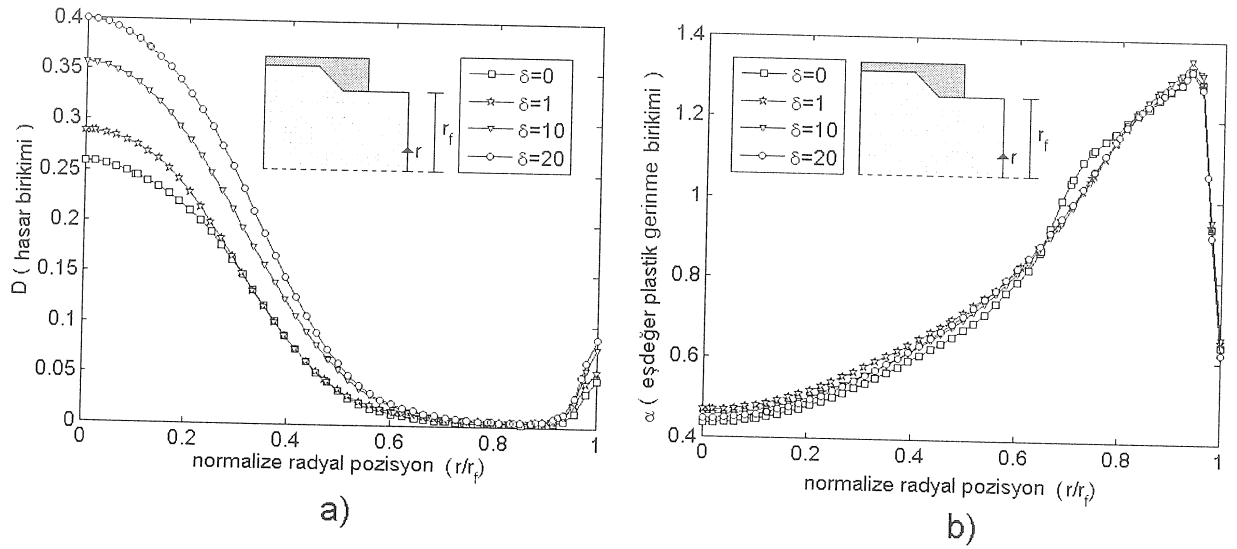


Şekil 2: Farklı malzeme parametreleri için pekleşme dağılımları.

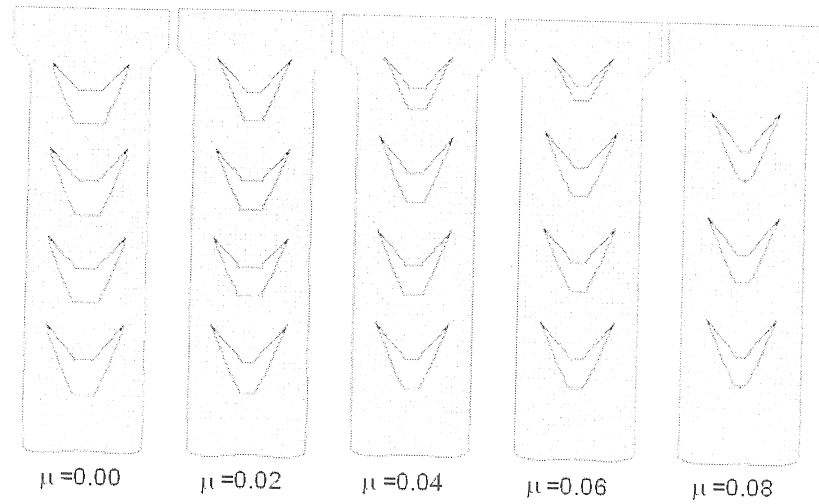
Bu pekleşme eğrileri için, sürtünmesiz koşullarda elde edilen, Şekil 3.a ve b'de verilen radyal hasar ve eşdeğer plastik gerinme dağılımları incelendiğinde görülmektedir ki, durağan eşdeğer plastik gerinme değerleri arasındaki fark az da olsa, hasar birikimleri arasında ciddi farklar mevcuttur. Buna göre hızla doyma gerilmesine ulaşan malzemelerde merkezi hasar birikimi daha fazla olmaktadır. Bunun nedeni yüzey ve merkezde meydana gelen akma ve akmaya direnme koşulları ile oluşan gerilme dağılımlarıdır.

İş parçası-kalıp arası sürtünme ilişkisinin hasar birikimine ve kırık morfolojisine etkisini

incelemek adına $\mu = 0$, $\mu = 0.02$, $\mu = 0.04$, $\mu = 0.06$ ve $\mu = 0.08$ için bir grup analiz yapılmıştır. Sonuçta elde edilen kırık dağılımları Şekil 4'te verilmektedir. Görüldüğü gibi düşük sürtünme değerlerinde daha sık ve geniş kırıklar elde edilirken, yüksek sürtünme değerlerinde hem daha seyrek hem de daha küçük kırıklar oluşmaktadır. Bunun nedeni hasar birikiminin sürtünme ile birlikte kısmen de olsa merkezden yüzeye taşınması ve merkezi etkinliğinin azalmasıdır.



Şekil 3: Farklı pekleşme katsayıları için radyal dahili değişken dağılımları, a) hasar, b) eşdeğer plastik gerinme, $\mu = 0$.



Şekil 4: Farklı sürtünme katsayıları için elde edilmiş kırık morfolojileri.

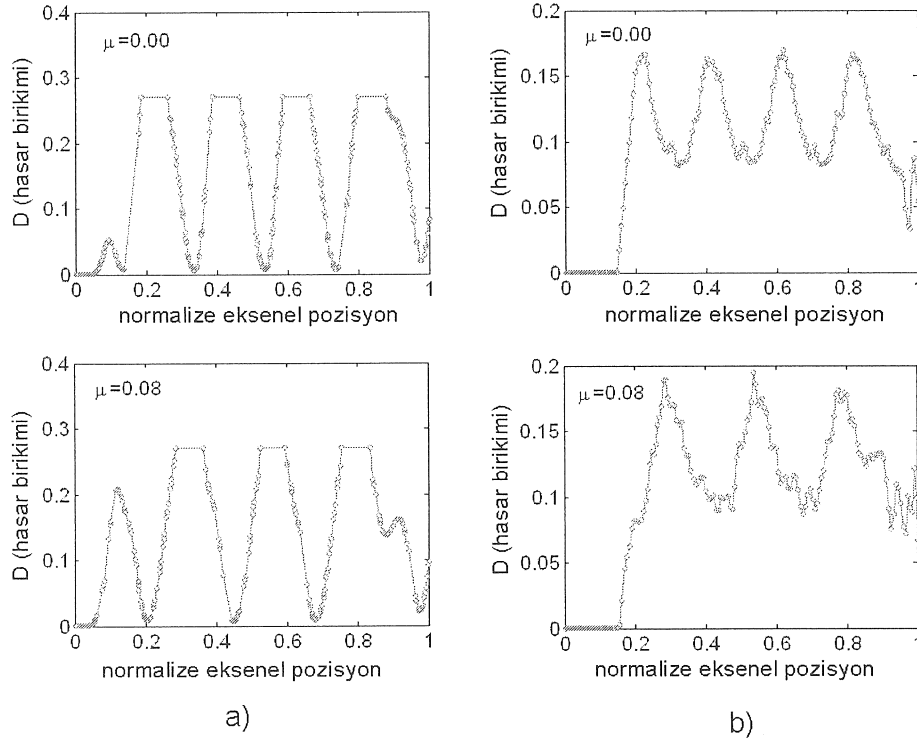
Kırık dağılımları verilen iki uç sürtünme durumu için eksen boyunca oluşan merkezi ve yüzeyel hasar dağılımları sırası ile Şekil 5.a ve b'de verilmektedir. Görüldüğü gibi merkezi hasar değerleri kırık oluşumunda esas alınan kritik hasar değeri olan $D_{cr} = 0.27$ değeri ile sınırlıdır ve hasar dağılımı dalgali bir yapıya sahiptir. Serbest kırık yüzeyinde kritik hasar değerine ulaşan merkezi hasar birikimi bir sonraki kırık oluşumuna kadar, önce azalmakta ve sonra uygun mekanik alanların sağlanması ile tekrar artmaktadır. Şekil 5.b'de verilen yüzey hasar birikimlerine bakıldığında, bu birikimlerde de dalgalanma frekansının kırık frekansı ile örtüştüğü ve sürtünmeli koşullarda yüzeydeki birikimin sürtünmesiz koşullara nazaran daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Buna göre sürtünme ile merkezi hasar birikiminin bir kısmı yüzeye taşınmakta, bu da kırık frekansını etkilemektedir.

İşlem geometrilerinin hasar birikimi ve kırık oluşumuna etkisini araştırmak adına, malzeme parametreleri aynı kalmak koşulu ile bir grup kalıp açısı ve alan indirgeme oranı için benzetimler gerçekleştirilmiştir. Buna göre Şekil 6.a'da da gösterildiği gibi, minimum merkezi hasarın sağlandığı en güvenli kombinasyon, düşük kalıp açıları ile yüksek alan indirgimlerinin kullanıldığı kombinasyon olarak görülmektedir. Gözlenmektedir ki, kırık oluşturan benzetimler, yüksek alan indirimi ile yüksek kalıp açıları arasında gerçekleşmektedir.

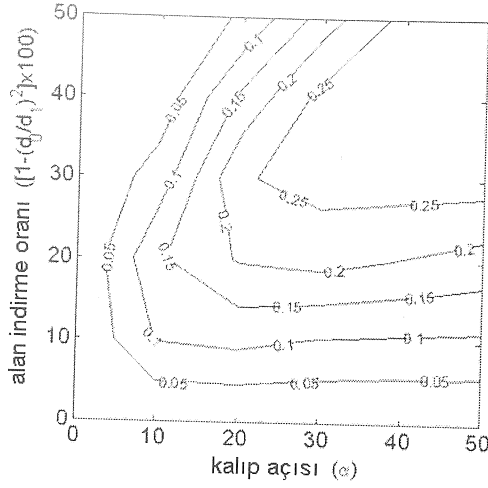
Değilmelidir ki, bu benzetimler sürtünmesiz koşullarda gerçekleştirilmiştir.

3. EKSTRUZYONDA TERS BASINÇ UYGULAMASININ HASARA ETKİSİ

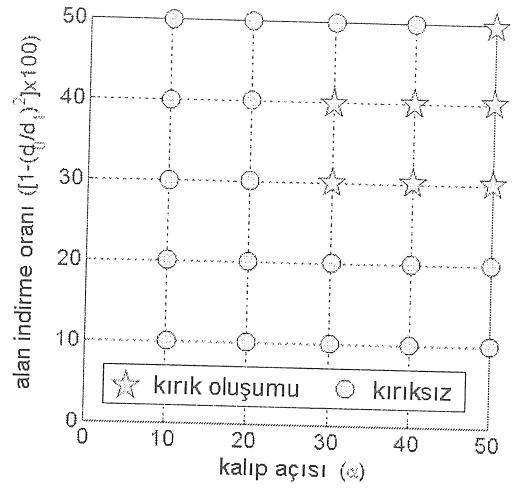
Çalışmanın birinci kısmında da gösterildiği gibi, ekstrüzyon işleminde kırıkların önlenmesinde temel amaç plastik şekillendirme bölgesinde oluşan hidrostatik gerilmelerin basma yönünde kalmasını sağlamak olduğundan, bunun sağlanması adına işlem parçasının kalıba sürülen ön ucundan ters basınç uygulanabilir. Wagener ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, uygulanan ters basıncın, merkezi hidrostatik gerilme değerlerini kabul edilebilir sınırlarda tutarak malzeme şekillenebilirliğini artırdığını göstermiştir, öyle ki bu uygulama sayesinde, oldukça gevrek davrandığı bilinen SiC parçalı ve alüminyum alaşımlı matrise sahip MMC'lerin bile, düşük karbonlu çelikler gibi, oldukça rahat şekillenebildiği gözlenmiştir, [3, 4, 5]. Ayrıca uygulanan ters basınç sayesinde, kalıp çıkış bölgesinde oluşan artık gerilmeler azalmakta ve daha homojen plastik gerilmeler elde edilmektedir. Bu avantajlarına rağmen ters basınç uygulaması çeşitli sınırlamalara tabidir. Bu sınırlamaların başında ters basıncın ileri zımba kuvveti ihtiyacını artırması nedeni ile uygulanabilir zımba kuvveti, zımba ve kalıp dayanımları gelmektedir.



Şekil 5: Farklı sürtünme katsayıları için elde edilmiş eksenel hasar dağılımları, a) merkez, b) yüzey.



a)



b)

Şekil 6: a) Maksimum merkezi hasarı gösteren eş-hasar eğrileri, b) Kırıklı ve kırksız benzetim dağılımları, $\mu = 0$.

Bu motivasyonla, Wagener'in deneysel olarak incelediği ters basınçla hasar önlenmesi için sayısal bir çözümün ne önerdiği incelenmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, ters basınç etkisi, basit bir yaklaşımla, işlem parçasının uç kısmının yüzeyine, zımba kuvvetinin aksi yönünde basınç uygulaması ile modellenmiştir ve bir grup benzetim gerçekleştirilmiştir.

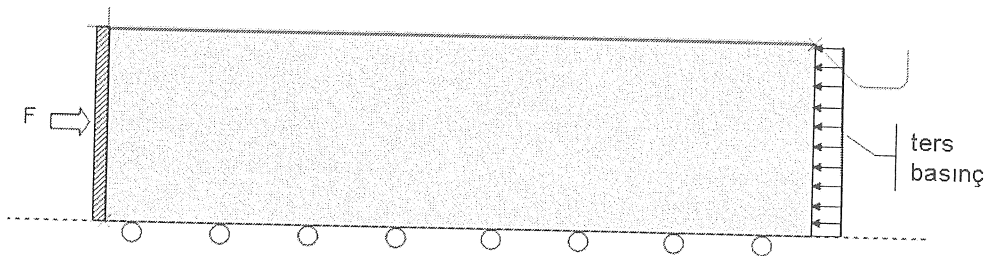
Şekil 8'de sürtünmeli ve sürtünmesiz koşullarda farklı ters basınç değerleri için ölçülen radyal hasar değerleri verilmektedir. Beklendiği gibi, ters basınç uygulaması ile birlikte merkezi ve yüzeyel hasar birikiminde hatırı sayılır bir azalma gözlemlenmiştir. Görülmektedir ki sürtünmeli koşullarda merkez hasar değeri daha düşük olmakta, yüzeyde ise sürtünmesiz koşullara nazaran bir artış gerçekleşmektedir. Bu, Şekil 5'te verilmekte olan eksen boyunca merkez ve yüzeyde oluşan hasar dağılımları ile uyumlu bir bulgudur.

Şekil 9'da, bir grup karşı basınç değeri için, sürtünmesiz koşullarda oluşturulmuş benzetim sonuçları gösterilmektedir. Benzetimler göstermektedir ki, karşı basıncın yükselen

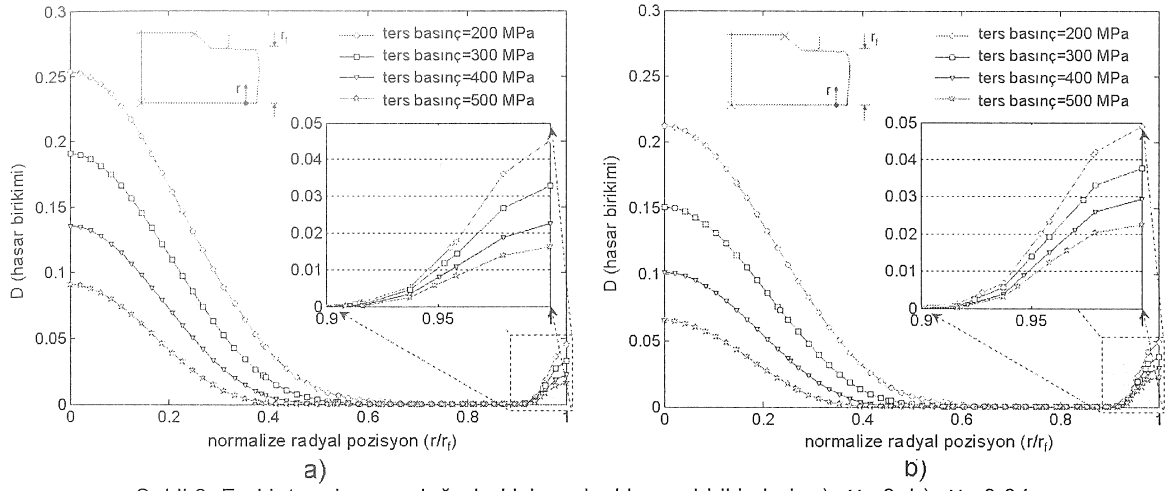
değerlerinde oluşan kırıklarda gözle görülebilir bir azalma ve nihayetinde tamamen yok olma gözlemlenmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, kırık oluşumunun engellenmesi her ne kadar karşı basınç ile mümkün görülsede, karşı basınç uygulaması çeşitli kısıtlamalara tabidir. Bu kısıtlamaların başında zımba ile uygulanabilecek kuvvet gelmektedir. Takdir edilir ki karşı basınç sisteminin zımba kuvveti talebinde artışa neden olur. Bu artışı gözlemlemek adına, Şekil 10'da verilen, farklı ters basınç değerleri için, sürtünmesiz koşullarda elde edilen zımba kuvveti-normalize işlem zamanı eğrileri oluşturulmuştur. Beklendiği gibi kırksız bir analizin sağlanması adına ters basınç uygulaması, zımba kuvveti talebini yaklaşık olarak %30 artırmıştır. Şekil 9'da dikkat çeken bir unsur da, kırıkların küçülmesi ve nihayet yok olması ile eğrilerde oluşan dalgalanmalara ait genliklerin de sönümlenmesidir.

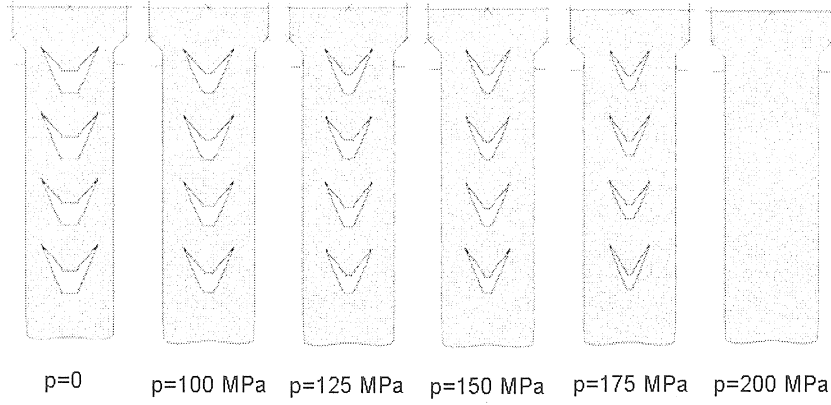
Dikkat edilmesi gereken bir husus da, zımba kuvvetindeki artışın getirdiği ek gerilmelerin kalıp ve zımba dayanımlarını aşmaması gerekliliğidir.



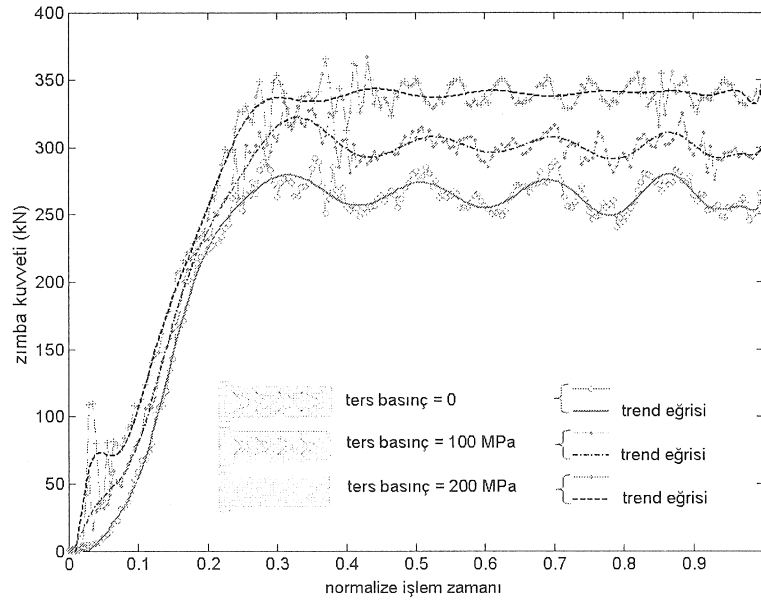
Şekil 7: Ekstrüzyonda ters basınç uygulamasının modellenmesi.



Şekil 8: Farklı ters basınç değerleri için radyal hasar birikimleri, a) $\mu=0$, b) $\mu=0.04$.



Şekil 9: Farklı ters basınç değerleri için elde edilmiş kırık morfolojileri, $\mu=0$.

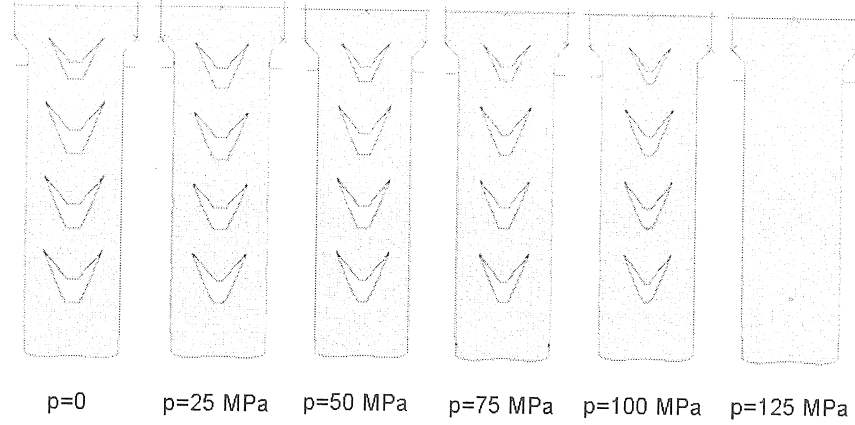


Şekil 10: Farklı ters basınç değerleri için elde edilmiş zimba kuvveti-normalize işlem zamanı eğrileri, $\mu=0$.

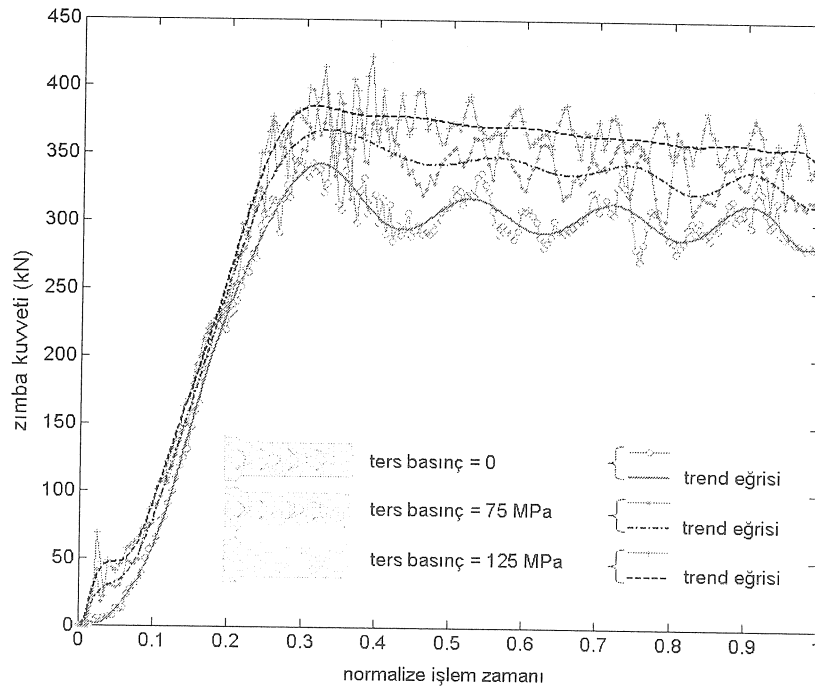
Aynı benzetimlerin, Şekil 11'de verilen, sürtünmeli koşullarda gerçekleştirilenleri incelenirse, kırık sağaltımının çok daha düşük karşı basınç değerlerinde gerçekleştiği gözlenir. Bu durum, hem sürtünmenin önceden açıklanmış merkezi hasarı azaltan yapısı ile, hem de sürtünme ile oluşan ek karşı basınç oluşumu ile açıklanabilir.

Şekil 12'de farklı ters basınç değerleri için, sürtünmeli koşullarda elde edilen zımba kuvveti-

normalize işlem zamanı eğrileri oluşturulmuştur. Sürtünmesiz koşullar için Şekil 10'da verilen eğrilerin aksine, ekstrüzyon işlemi boyunca, sürtünen yüzeyde meydana gelen azalma ile zamanla zımba kuvveti talebi düşmektedir. Yine de ters basınç uygulaması zımba kuvveti talebini artırmıştır. Şekil 9'da gözlemlendiği gibi, kırıkların küçülmesi ve nihayet yok olması ile eğrilerde oluşan dalgalanmalara ait genlikler sönümlenmektedir.



Şekil 11: Farklı ters basınç değerleri için elde edilmiş kırık morfolojileri, $\mu = 0.04$.



Şekil 12: Farklı ters basınç değerleri için elde edilmiş zımba kuvveti-normalize işlem zamanı eğrileri, $\mu = 0.04$.

4. SONUÇ

İleriye çubuk akıtma işleminde oluşan merkezi hasar birikimi, kırık oluşumu, ve çeşitli işlem parametrelerinin bu oluşumlara etkisi üzerine kapsamlı bir çalışma sunulmuştur. Bir malzeme parametresi olarak belirlenen kırık kapanma parametresinin, hasarın merkezi ya da yüzeysel karakteri üzerinde son derece etkin olduğu gösterilmiştir. Seçilen işlem geometrisi için, hızlı doyma gerilmesine erişen malzemelerde, ekstrüzyonda merkezi hasar birikimlerinin yavaş erişenlere nazaran daha fazla olduğu gözlenmiştir. Gösterilmiştir ki merkezi hasar birikimi sürtünmenin artırımı ve karşı basınç uygulaması ile azaltılabilmektedir. Alan indirme oranı-kalıp açısı düzleminde yapılacak tekrarlı analizler vasıtası ile çeşitli malzemeler için literatürde görülenlere benzer kırıksız numune temin eğrileri çizilebilir. Elde edilen eğrilerde, alan indiriminin çok olup kalıp açısının az olduğu durumlar en az merkezi hasar birikimi görülen durumlar olarak belirlenmiştir. Görülmektedir ki, önerilen sayısal yöntem, farklı işlem koşullarını aynı sistematik içerisinde kapsayabilecek genelliktir.

CONTINUUM DAMAGE MECHANICS (CDM) APPLICATIONS IN COLD FORMING: PART II-PREVENTING CHEVRON CRACK FORMATION IN EXTRUSION

In this part of the manuscript, numerical studies based on CDM for prevention of central crack formations seen in cold forward extrusion with selection of appropriate process parameters. An in depth investigation of the effect of certain parameters such as, crack closure parameter, hardening exponent, friction, die angle, area reduction ratio and applied counter-pressure, on central damage accumulation is conducted. It is shown that, with a set of numerical analysis scanning the die angle-area reduction ratio space, economical production of the limiting values for the geometries for a defect-free product is possible. Another tempting part of the proposed numerical method is its generality to cover different process conditions in a single systematic. As an example, the effect of the counter pressure added to the process design, on the damage accumulation is numerically modeled and it is shown cracks can be suppressed under proper counter pressure values.

Keywords: Forward extrusion, Continuum Damage Mechanics, Finite Elements, Chevron cracks

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, MISAG JULICH 04 kodu ile, TÜBİTAK ile Almanya Jülich Araştırma Merkezi Arasındaki İşbirliği Çerçevesinde Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar bu desteğe teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Avitzur, B.: *Analysis of central bursting defects in extrusion and wire drawing*, J. Mech. Phys. Solids, 1968, 90, 79-91.
2. Zimerman, Z., Avitzur, B.: *Analysis of central bursting defects in extrusion and wire drawing*, 1970, J. Eng. Ind. 90, 135-145.
3. Wagener, H. W., Haats, J., Wolf, J.: *Increase of workability of brittle materials by cold extrusion*. *Journal of Materials Processing Technology*, 32, 1992, pp. 451-460.
4. Wagener, H. W., Wolf, J.: *Cold forging of MMCs of aluminium alloy matrix*. *Journal of Materials Processing Technology*, 37, 1993, pp. 253-265.
5. Wagener, H. W., Haats, J.: *Crack prevention and increase of workability of brittle materials by cold extrusion*, in: *Material Processing Defects*, Elsevier Science B. V., 1995, pp. 373-385.

Yumuşak Doku Mekanik Davranışının Modellenebilmesi için Yerde Canlı (*in vivo*) İndentör Deneyleri

Ali Tolga Petekkaya
Makina Yüksek Mühendisi
Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ankara

Ergin Tönük
Y. Doç. Dr.
Makina Mühendisliği Bölümü
Biyomedikal Mühendisliği
Lisansüstü Programı
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ankara

*Yumuşak biyolojik dokular mühendislik malzemeleri ile karşılaştırıldıklarında daha karmaşık mekanik yanıtı sahip canlı yapılardır. Yumuşak dokuların malzeme kanununun anlaşılabilmesi için ilk adım yapılacak sistematik deneylerdir. Farklı yumuşak doku deney yöntemleri olmakla birlikte bu çalışmanın amacı insan bedeninin çevre ile mekanik etkileşimini modelleyecek bir mekanik malzeme modeli oluşturulması için deneysel veri toplanması olduğundan yerinde canlı (*in vivo*) deneysel yöntem seçilmiş ve elimizde bulunan yumuşak doku indentör cihazı yardımıyla deneyler yapılmış, bu deneylerin sonuçları sunulmuştur. Deneylere başlamadan önce, doğru ve güvenilir ölçümlerin yapılabilmesi için indentör ucu hareket hassasiyeti ve yumuşak doku tepki kuvveti verisi ölçüm hassasiyeti geliştirilmiştir. Kuvvet ölçümündeki verilerden gürültünün temizlenmesi için uygun filtre seçilip kullanılmıştır. Deneylerin daha hassas ve rahat bir şekilde yapılabilmesi için indentör cihazını dokuya bağlayacak yeni bir sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. Yapılan iyileştirmeler ve eklemlerin ardından önkol üzerinde deneyler yapılmıştır. Deney protokolleri, devirli yükleme, gevşeme ve sünmedir. Dokunun devirli yükleme altında sergilediği alışma (Mullins) etkisi ve farklı hızlara yanıtı histeresiz büyüklükleri gözlenerek araştırılmıştır. Deney sonuçlarından önkol yumuşak dokusunun gevşeme ve sünme özellikleri gösteren, deneyin ilk birkaç devrinde alışma etkisi gösteren sonrasında tekrar edilebilir sonuçlar veren, belirgin biçimde mekanik enerji kaybına neden olan (histeresiz) malzeme özellikleri gösterdiği görülmüştür. Gevşeme ve sünme deney sonuçları kullanılarak bu verileri modelleyebilecek farklı Prony serilerine ait parametrelerin değerleri ve modelleme hassasiyetleri tespit edilmiştir. Elde edilen verilerin yumuşak doku malzeme kanununun belirlenmesi için katkısı olacaktır.*

*Anahtar Kelimeler: Yumuşak Biyolojik Dokular, Malzeme Özellikleri Karakterizasyonu, Mekanik Test, Yerde Canlı (*in-vivo*) İndentör Deneyleri, Viskoelastisite, Alışma (Mullins) Etkisi, Prony Serileri*

GİRİŞ

İç organlar, kas, kiriş (tendon), bağ (ligaman), damar, deri ve kıkırdak gibi iskelet sistemimiz dışındaki neredeyse bütün organlarımız yumuşak dokulardan oluşmaktadır. Yaşamımızı sürdürebilmemiz ve konforlu bir yaşam sürebilmemiz için büyük önem taşıyan bu organlarımızın mekanik davranışları mühendislik malzemeleri ile karşılaştırıldığında daha karmaşıktır. Bunun iki temel nedeni canlı olmaları ve fizyolojik yapılarıdır.

Yumuşak biyolojik dokular canlı yapılar oldukları için mekanik davranışları birçok etmeden etkilenir. Bu etmenlerden en önemlileri çeşitli hastalıklar ve yaşlılıktır. Kanseri, diyabet ve damar hastalıklarına bağlı olarak dokunun esnekliğini kaybettiği ve daha direngen davrandığı gözlenmiştir [1-4]. Yaşlılıkla birlikte doku davranışının hastalıklarda gözlenen duruma benzer bir davranış sergilediği ve esnekliğini kaybederek daha direngen davrandığı gözlenmiştir [5-7].

Yumuşak dokular karmaşık bir fizyolojik yapıya sahiptir ve bir çeşit bileşik (kompozit) malzemedir. Yapılarında farklı işlevi bulunan birçok eleman bulunur. Bu elemanlardan bir çoğu tek tek incelendiğinde yumuşak doku mekanik davranışı sergileyebilmekte ancak mekanik yanıtları belli oranlarda farklılaşabilmektedir [6, 8]. Yine bu dokular çevre organ ve yapılarla da etkileşim halinde olup, bu etkileşimin mekanik yanıtlarını üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir [9].

Tüm malzemelerde olduğu gibi yumuşak dokularda da mekanik özelliklerin belirlenmesi deneysel olarak gerçekleştirilir. Yapılan yumuşak doku deneyleri gerilme-gerinme ilişkisinin doğrusal olmadığını, yüklenme ve boşaltma yapıldığında gerilme-gerinme ilişkisinin yüklenme ve boşalma durumlarında birbirinden belirgin biçimde farklı olduğunu ve iki eğri arasında histeresiz olarak adlandırılan, mekanik enerji kaybını gösteren bir alan oluştuğunu [10], sabit gerinme altında gerilmenin zamanla azaldığını (gevşeme) [11], sabit gerilme altında gerinmenin zamanla arttığını (sünme) [11] ve dokunun ilk birkaç devirde daha direngen, sonrasında ise azalmış direngenlikle tekrar edilebilir yanıt verdiğini (alışma veya Mullins etkisi) [10] göstermiştir. Bu özelliklere ek olarak yumuşak dokunun mekanik özelliklerinin yöne bağımlılığı da (anizotropi) bilinmektedir [10, 12,13].

Yumuşak biyolojik doku mekanik davranışlarının gözlenebilmesi için ilk adım yapılacak sistematik deneylerdir. Yumuşak dokular üzerinde yapılabilecek deneyler dört sınıfta incelenebilir: Eks-vivo [14], in-situ [15], in-vitro [16-19] ve in-vivo (yerinde canlı) [20, 21] deneyler. Bunlardan yalnızca in-vivo olanında doku canlı ve kendi fizyolojik ortamındayken deney gerçekleştirir. Bu çalışmadaki amaç, insan bedeninin çevre ile mekanik etkileşimini modellemek üzere oluşturulacak ayrıntılı bir yumuşak doku mekanik modeli için deneysel veri sağlamak olduğu için bilinen bazı sakıncalarına rağmen çalışma için kullanılacak en uygun yöntemin yerinde canlı deneyler olduğuna karar verilmiştir. Yerinde canlı deney yönteminde doku canlı ve kendi fizyolojik ortamında olduğu için elde edilen mekanik yanıtın da canlı insan bedeninin çevre ile etkileşimdekine en yakın olacağı düşünülmektedir. Genellikle dışarıdan erişilebilir organlar üzerinde çalışmaya uygun olan bu yöntemin girişimsel olmayan çeşidi kullanılarak iç organlar üzerinde de uygulanabilmektedir [20]. Ancak girişimsel olmayan yöntemle ilgili ek bazı sınırlamalar da vardır.

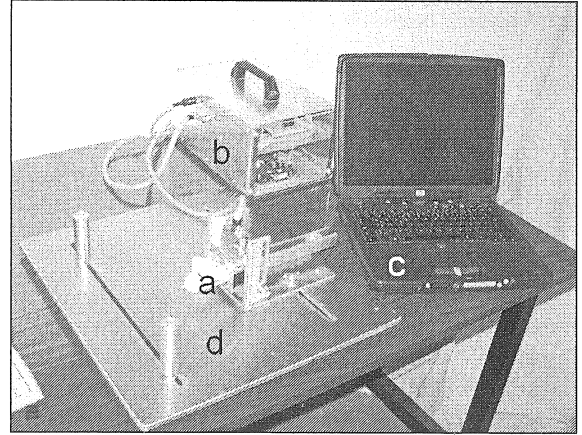
Farklı deney sistemleri kullanarak yerinde canlı deneyler yapılabilir [22-24] ancak bu sistemler içinde en yaygın olarak kullanılanı indentör sistemleridir [10, 21, 25-27]. Bunun temel nedenleri olarak, farklı deney protokollerinin aynı sistem kullanılarak uygulanabilirliği, ve farklı doku özelliklerinin

gözlenebilirliği ile sistemin kullanım kolaylığı ve yalınlığı sıralanabilir. İndentör cihazlarıyla yapılan deneyler, bilinen belirli bir geometrideki indentör ucunun malzeme yüzeyine önce temas etmesi sonra da yüzeyi iterek içeri doğru şekil değiştirmesi ve bu sırada, zaman, yumuşak doku tepki kuvveti, ve ucun yer değiştirme bilgilerinin eş-zamanlı olarak kayıt edilmesi ile yapılır.

İNDENTÖR DENEY CİHAZI

Bu çalışmada yumuşak biyolojik doku deneylerini gerçekleştirmek için elde bulunan özel yapım diz altı ampütasyon cerrahisi geçirmiş bireylerin ampütasyon güdüğünde yumuşak doku mekanik özelliklerinin belirlenmesi için tasarlanmış [28] ve TÜBİTAK MİSAG-183 proje desteğiyle geliştirilmiş indentör deney cihazı kullanılmıştır. Cihazın özellikleri gereği farklı beden bölgelerinde de yumuşak doku mekanik deneylerini kolaylıkla yapabilmektedir. İndentör deney cihazını kullanarak yumuşak dokularla ilgili üç temel deney protokolünü yerinde canlı (*in-vivo*) olarak uygulamak mümkündür. Bunlar devirli yüklenme, gevşeme ve sünme deney protokolleridir.

Kullanılan indentör deney cihazı dört ana birimden oluşmaktadır. Bunlar taşınabilir bilgisayar, denetim kutusu, deney birimi ve indentör cihazı sabitleme aparatıdır (Şekil 1).



Şekil 1. İndentör deney cihazı (a), denetim kutusu (b), dizüstü bilgisayar (c), indentör cihazı sabitleme aparatı (d).

Dizüstü bilgisayar, deney biriminin kontrolünü sağlayan yazılımın yüklü olduğu ve deneyler sonucu elde edilen verilerin toplanıp işlendiği ve depolandığı elemandır. Denetimi sağlayan yazılım Matlab 6.1[®] ve "Data Acquisition Toolbox" kullanılarak hazırlanmıştır.

Denetim kutusu, National Instruments 6020E veri toplama kartı, adım motorunu sürmekte

kullanılan gerilim-frekans çevirici, adım motoru sürücü kartı, adım motorunu ve yük ölçeri besleyen güç kaynaklarını barındırmaktadır.

Deney birimi yumuşak doku deneylerini gerçekleştiren birimdir. Haydon Switch Instrument 43000 serisi doğrusal hareketli adım motoru ve Entran ELW-D1-50N yük ölçer ile yumuşak dokuyu yüklemek ve şekil değiştirmesini sağlamak üzere kullanılan bilinen geometrideki indentör ucundan oluşmaktadır. Adım motoru çözünürlüğü adımda 50 μm 'den biraz küçük olup, yük ölçer ise 50 N' a kadar olan tepki kuvvetlerini ölçebilmektedir [28].

İdentör deney cihazının son bileşeni indentör cihazı sabitleme aparatıdır. Bu bileşen bu çalışma kapsamında geliştirilip üretildiğinden ayrı bir başlık altında ayrıntılı olarak incelenecektir.

İNDENTÖR CİHAZI SABİTLEME APARATI

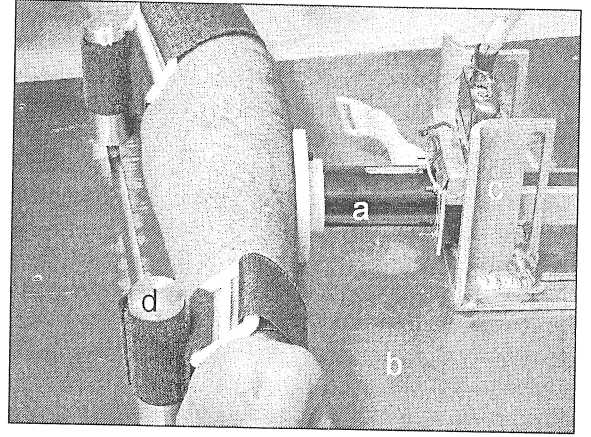
Yumuşak biyolojik dokular canlı yapılar olduğundan özellikle in-vivo olarak gerçekleştirilen deneyler laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerle kıyaslandığında, hataya daha açıktır [21]. Deneyden elde edilen yer değiştirme-tepki kuvveti-zaman bilgisinden malzeme kanununu belirlemek için gerekli olan gerilme-gerinme-zaman bilgisini elde etmek için kullanılan yöntemler (örneğin evrik sonlu elemanlar modelleri) deneysel verideki hata ve belirsizliklere duyarlıdır. İdentör cihazının deney yapılacak bölgeyle bağlantısını sağlayacak yöntemde hem bağlantı hatalarının önlenmesi hem de çevresel faktörlerin etkisinin en aza indirgenmesi açılarından önemlidir.

Doku ile deney birimi arasında bağlantı daha önceki tasarımda bir kemer aracılığıyla yapılmaktaydı [28]. Ancak bu görece basit bağlantı şekli ile ilgili şu problemler gözlenmiştir:

- Kemerin sıkma miktarına bağlı olarak ölçüm yapılan noktadaki doku kalınlığı, ön-gerilme ve gerinmeler değişmekteydi. Böylece aynı noktada yapılan deneylerde kemerin farklı biçimde sıkılmasından kaynaklanan ve miktarı tam olarak belirlenemeyen ön-gerilme ve gerinmeler olmaktadır.
- Tekrarlı deneyler için doku üzerinde aynı deney noktasının korunması ve gözlenmesi güç olmaktadır. Bu güçlük aynı noktada farklı deney protokolleri uygulandığında problem olmakla birlikte özellikle doku anizotropisinin belirlenmesine yönelik deneylere ileriki çalışmalarda başlanmasıyla birlikte daha da önemli bir sorun olacaktır.

Anılan sorunların çözümü için bu çalışma kapsamında bir indentör cihazı sabitleme aparatı geliştirilmiştir (Şekil 2). Bu çalışmadaki deneyler ön kol üzerinde gerçekleştirildiğinden aparat bu durum

göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. İdentör cihazı sabitleme aparatı, tabla, kol dayanakları ve indentör cihazı konumlandırıcısı olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır.



Şekil 2. Özellikle ön kol üzerinde çalışılmak üzere tasarlanmış indentör cihazı sabitleme aparatı. Burada; indentör deney cihazı (a), tabla (b), indentör cihazı konumlandırıcısı (c), ve kol dayanakları (d).

Tabla:

Üzerinde diğer elemanların bağlandığı iki yol bulunan bileşendir. Kol dayanakları ve indentör cihazı konumlandırıcısı bu yollar üzerinde uygun konumlarda sabitlenebilir.

Kol Dayanakları:

Biri bilek kemiğine diğeri de dirsek kemiğine denk gelecek şekilde tabla yolu üzerinde sabitlenen bileşenlerdir. Böylece indentör ucunun etki ettiği kolun yüklemeye yönünde görece katı (rijid) noktalardan sabitlenerek yer değiştirmesine engel olunur.

İdentör cihazı konumlandırıcısı:

Üzerindeki yollar aracılığıyla deney biriminin kol üzerinde deney yapılması öngörülen bir noktaya, indentör ucunun doku yüzeyine dik olarak etki edebilecek şekilde sabitlenmesini sağlayan bileşendir. İdentör cihazı bu bileşen aracılığıyla, ileri-geri, yan, aşağı-yukarı ve açısal olarak istenen konuma getirilerek sabitlenebilir.

DENEYLER ÖNCESİ İNDENTÖR CİHAZINDA YAPILAN İYİLEŞTİRMELER

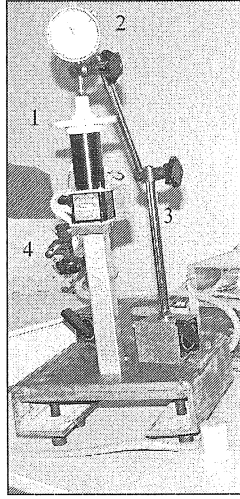
Güvenilir, hassas ve tekrar edilebilir ölçümler yapılabilmesi için indentör deney cihazı üzerinde çeşitli değerlendirmeler yapılmış ve elde edilen sonuçlara bağlı olarak cihazı kontrol eden yazılım

üzerinde iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmeler:

- İndentör ucu hareket hassasiyetinin ve tekrar edilebilirliğinin incelenmesi,
- Yumuşak doku tepki kuvveti verisinin hassasiyetinin ve tekrar edilebilirliğinin incelenmesi.

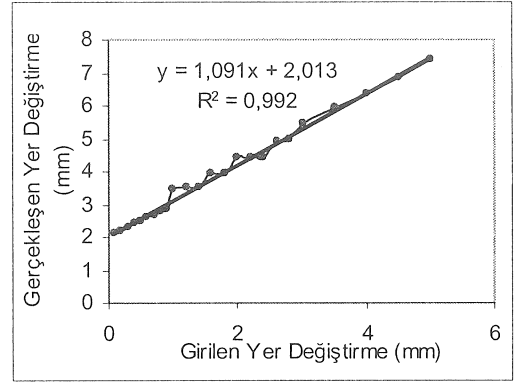
İndentör Ucu Hareket Hassasiyetinin ve Tekrar Edilebilirliğinin İncelenmesi:

İndentör ucu hareketinin değerlendirilmesi için Şekil 3'te gösterilen deney düzeneği kurulmuştur. Düzenek iki Mitotoyo manyetik ayak ve 10 µm hassasiyetli bir Mitotoyo komparatörden oluşmaktadır. 0.2-10 mm/s motor hız aralığında ve her hız için 0.1-5 mm yer değiştirme aralığında ölçümler yapılmıştır. Denetim arayüzüne girilen yer değiştirme miktarları için elde edilen indentör ucunun hareketi, komparatör yardımıyla hassas olarak belirlenmiş ve kaydedilmiştir.



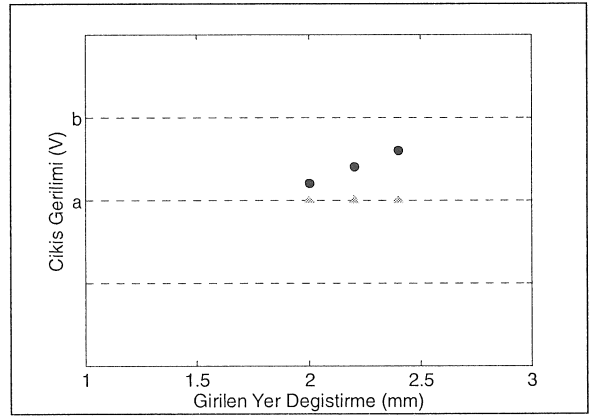
Şekil 3. İndentör deney cihazının hareketinin incelenmesi için kurulan düzenek. Resimde, deney birimi (1), komparatör (2), manyetik ayak-1 (3), manyetik ayak-2 (4) görülmektedir.

Deneyler sonucu tespit edilen ilk durum 2 mm/s motor hızından sonra oluşan niceleme hatalarıdır. Hassasiyetle ilgili olan bu hatada belli girilen yer değiştirmeler için indentör ucunun hareket ettiği miktar eşit olmaktadır. Şekil 4'te 5 mm/s motor hızı altında gerçekleştirilen deneyde bu durum gözlemlenir. 1.6-1.8 mm, 2-2.2-2.4 mm ve 2.6-2.8 mm giriş değerleri için hareket miktarları eşit olmuştur.



Şekil 4. 5 mm/s motor hızında gerçekleştirilen deneyin sonucu ve niceleme hatası

Bu hata sistem tarafından karşılanabilecek en küçük elektrik gerilimi artışının (12 bit analog gerilim çıkış çözünürlüğünün) yetersiz kalmasından meydana gelmiştir. Şekil 5'den de görülebileceği gibi 2, 2.2 ve 2.4 mm'lik giriş değerleri a-b çıkış gerilim aralığına denk gelmektedir. Buna bağlı olarak farklı üç giriş değeri için çıkış değeri olarak a gerilimi sağlanmakta ve indentör ucunun aynı miktarda hareket etmesine neden olmaktadır.



Şekil 5. Niceleme hatası

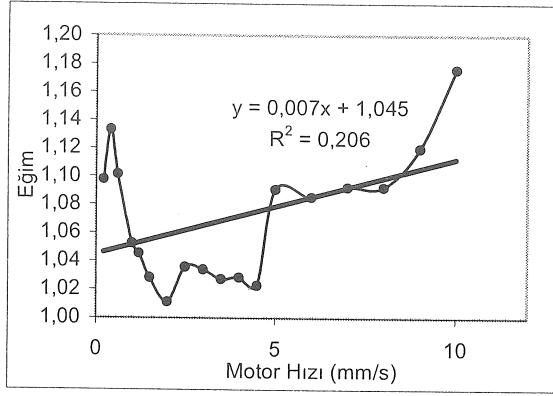
Ölçümler sonucunda tespit edilen diğer durum ise indentör ucunun hareketinde istenen değerlerden 0.05 mm ile 4.42 mm arasında sapma göstermesidir. Sapma miktarının artan hızla büyüdüğü gözlemlenmiştir. Yazılımda motor hızının belirlenmesi Denklem 1 aracılığıyla olmaktadır:

$$g = A \times m + B \quad (1)$$

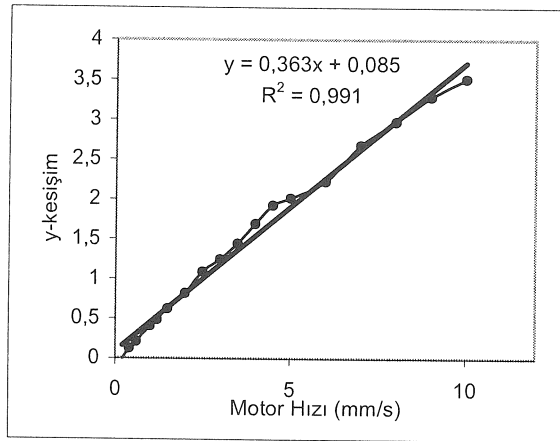
Burada; g, voltaj-frekans (V/F) çeviriciye veri toplama kartından iletilen gerilim, m, motor hızı, A ve B ise katsayılarıdır. Çalışmanın başlangıcında A ve B katsayıları değiştirilerek indentör ucunun istenen miktarlarda hareket ettirilebileceği düşünülmüştür. Ancak bir hız değeri için belirlenen katsayıların farklı

motor hızları için geçersiz olduğu ve indentör ucu hareketinin istenen değerden sapma gösterdiği belirlenmiştir (21). Buna bağlı olarak yalnızca Denklem 1'e ait katsayıların değiştirilmesiyle problemin giderilemeyeceği anlaşılmıştır.

Yine çalışmada girilen yer değiştirme-gerçekleşen yer değiştirme grafiklerine ait denklemlerin katsayıları kullanılarak Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerde eğim ve y-kesişim değerlerinin motor hızıyla değiştikleri görülmektedir.



Şekil 6. Eğim katsayısının motor hızına bağlı değişimi



Şekil 7. y-kesişimin motor hızına bağlı değişimi

Bu grafiklere ait denklemler tespit edilmiş ve Şekil 4 de görülen $y = Ax+B$ formundaki eşitlikte yerine konularak Denklem 2 elde edilmiştir.

$$x = \frac{y - Em - F}{Cm + D} \dots\dots\dots (2)$$

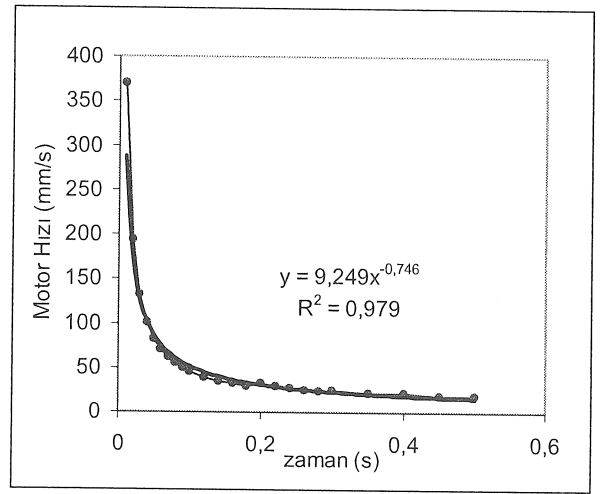
Böylece her hız değeri için geçerli olan ve indentör ucunun istenen miktarda hareketini sağlayacak denklem elde edilmiştir. Sonra bu denklem yazılımda uygun yere konularak deneyler

tekrarlanmıştır. Sonuçta indentör ucu gerçekten istenen miktarda hareket etmiş ancak deney sonucu elde edilen grafiklerde gözlenen yer değiştirme miktarı beklenenden küçük olmuştur.

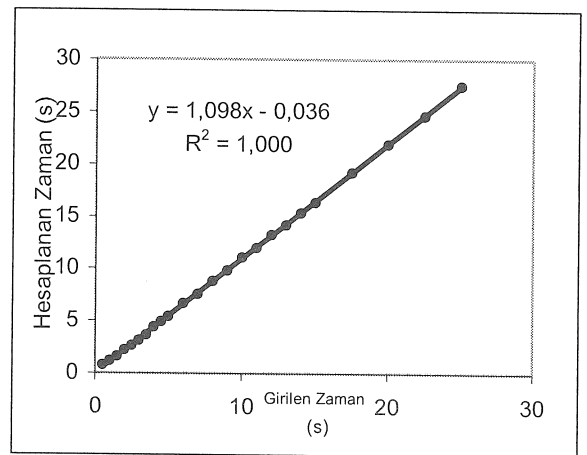
Bu problemin aşılabilmesi için aynı deney sonuçları kullanılarak üç farklı veri grubu daha elde edilmiştir.

- Hesaplanan motor hızı-zaman veri grubu (Şekil 8)
- Girilen zaman-hesaplanan zaman veri grubu (Şekil 9)
- Girilen yer değiştirme-hesaplanan zaman veri grubu (Şekil 10)

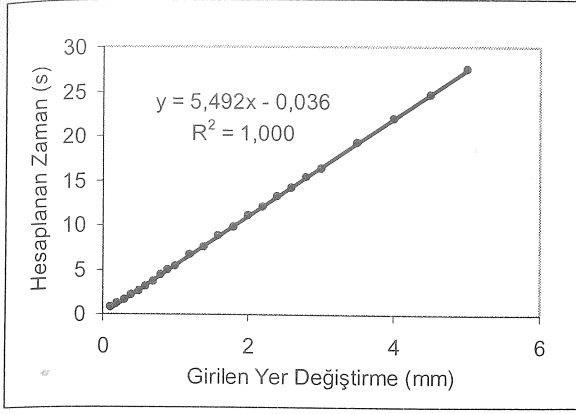
Girilen yer değiştirme-gerçekleşen yer değiştirme veri grubunda yapıldığı gibi bu veri gruplarına ait denklemlerin ilk ve ikinci katsayılarının motor hızına bağlı değişimlerini gösteren grafikler çizilmiştir. Sonrasında bu grafiklere ait denklemler kullanılarak Denklem 3, 4 ve 5 elde edilmiştir.



Şekil 8. 10 mm/s motor hızı için elde edilen zamana bağlı hesaplanan motor hızı-zaman grafiği



Şekil 9. 0.2 mm/s motor hızı için elde edilen girilen zaman-hesaplanan zaman grafiği



Şekil 10. 0.2 mm/s motor hızı için elde edilen girilen yer değiştirme-hesaplanan zaman grafiği

Elde edilen veriler ayrıntılı biçimde incelenmiş [21] ve tüm veri gruplarına ait aşağıda verilen denklemler elde edilmiştir.

$$mh_{hesaplanan} = C \times m^D \times t^{-B(E \ln(m) + F)} \quad (3)$$

Burada, $mh_{hesaplanan}$ verilerden hesaplanan girilecek motor hızı, t zaman, m motor hızı, C , D , E ve F sabitlerdir.

$$t_g = \frac{t_c - K \ln(m) - L}{Cx^4 - Dx^3 + Ex^2 - Fx + G} \quad (4)$$

Burada, t_g girilen zaman, t_c hesaplanan zaman, m motor hızı, C , D , E , F ve G sabitlerdir.

$$x = \frac{t_c - E \ln(m) - F}{Cm^{-D}} \quad (5)$$

Burada, x girilen mesafe, t_c hesaplanan zaman, m motor hızı, C , D , E ve F sabitlerdir.

Bu denklemler ayrı ayrı mevcut yazılımda uygun yerlere eklenerek indentör ucunun hareketi tekrar gözlenmiştir. Denklemlerin eklenmesiyle birlikte indentör ucu istenen miktarlarda hareket etmiştir. Ancak kullanılan denklemlere bağlı olarak motor hızı ve deney süresi istenenden farklı olmuştur.

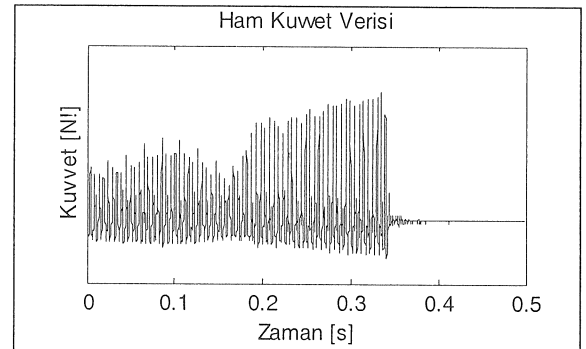
Bu çalışmaya ilave olarak veri toplama kartının motor hızını belirleyen çıkışındaki gerilim değerleri HP 34401A hassas dijital multimetre aracılığıyla kontrol edilmiştir. Bu çalışma için gerilim değerlerinin girildiği basitleştirilmiş bir ara yüz hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda girilen gerilim değerleri ile okunan gerilim değerleri neredeyse birbirine eşit çıkmış ve problemin kaynağının bu olmadığı anlaşılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Giriş gerilimlerine karşılık çıkış gerilimlerini gösteren tablo

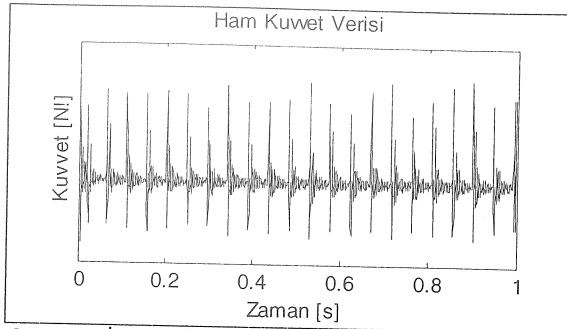
Giriş Gerilimi (V)	Çıkış Gerilimi (V)	Giriş Gerilimi (V)	Çıkış Gerilimi (V)
0	0.000157	4	3.9942
0.1	0.093	5	4.9951
0.2	0.195	5.1	5.0932
0.3	0.293	5.5	5.4937
0.4	0.395	6	5.9964
0.5	0.493	7	6.9923
0.75	0.747	8	7.9937
1	0.996	9	8.9944
2	1.9969	10	9.9955
3	2.9934		

Böylelikle, sistemin istenen hassasiyette çalışmamasının nedeninin yazılımdaki zamanlama sorunları olduğu anlaşılmıştır. Mevcut yazılımda indentör ucunun hareketi, kuvvet verisinin toplanması süresine bağlı olarak belirlenmiştir. Ancak bunun yeterli olmadığı anlaşılmış ve indentör hareketi için ayrıca zaman tayinini yapacak komutlar koda eklenmiştir. Bu eklentiyle birlikte indentör hareketinin düzeldiği gözlenmiş, 0-0.5 mm yer değiştirme aralığında kabul edilebilir, küçük sapmalar tespit edilmiştir.

Hareket hassasiyetinin sağlanmasıyla birlikte fark edilen diğer bir problem de indentör ucu hareketiyle kuvvet verisi toplanmasının eş zamanlı olmamasıdır. Şekil 11'de sunulan grafikte, adım motoru durduğu (ve buna bağlı olarak adımlardan kaynaklanan gürültü sona erdiği) halde kuvvet verisi bir süre daha toplanmaya devam etmektedir. Bu durum, indentör ucunun harekete başlaması ile kuvvet verisinin toplanmaya başlamasının eş zamanlı olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu problemin düzeltilmesi için kodda gerekli değişiklikler yapılmış ve eş zamanlılık sağlanabilmiştir (Şekil 12).



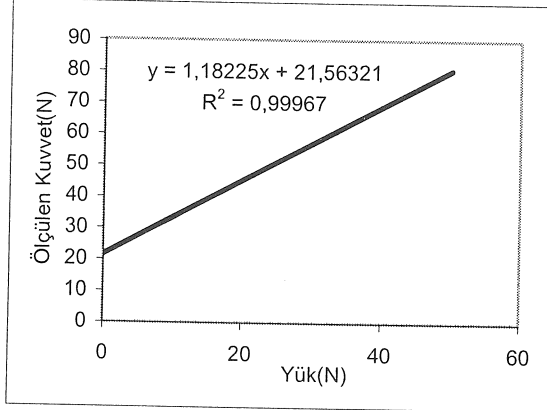
Şekil 11. 10 mm/s motor hızı ve 5 mm deplasman için elde edilen kuvvet-zaman grafiği



Şekil 12. İlk gerilim kuvvet verisi toplama ve indenter hareketini başlatma durumunda, 1 mm/s motor hızı ve 1 mm deplasman için elde edilen kuvvet-zaman grafiği

Yumuşak Doku Tepki Kuvveti Verisinin Hassasiyetinin ve Tekrar Edilebilirliğinin İncelenmesi

Kuvvet verisinin hassasiyetinin incelenmesi için 2 ile 50 N aralığında standart ağırlıklarla bir dizi durağan ölçüm yapılmış ve kalibrasyon eğrisi elde edilmiştir (Şekil 13). Grafiğe ait denklemden eğim katsayısı kuvvet ölçerinin üretici tarafından sağlanan kalibrasyon sabitinin zaman içinde bir miktar değiştiğini göstermektedir. Y-ekseni kesişim değeri ise yük hücresinin yüksüzken de sıfırdan farklı bir gerilim (offset) vermesinden kaynaklanmaktadır.

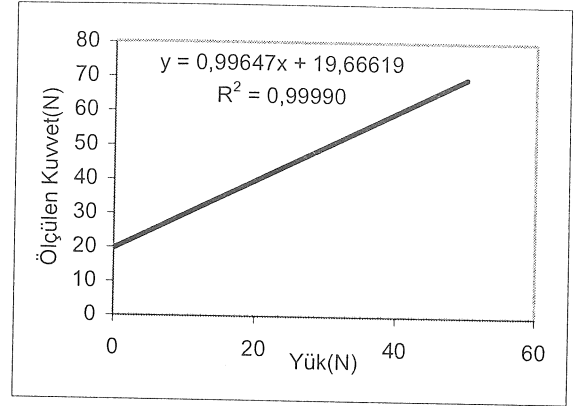


Şekil 13. Uygulanan yüke karşılık ölçülen kuvvet grafiği ve denklemi

Kuvvet verisindeki gerekli hassasiyetin sağlanması için eğim katsayısının 1'e eşitlenmesi ve y-kesişiminin mevcut kuvvet değerinden çıkarılması gerekmektedir. Eğim katsayısının 1'e eşitlenmesi için yazılımdaki algılayıcı aralığı değeri değiştirilmiştir. Uygun algılayıcı aralığının bulunabilmesi için eğim değeri ile algılayıcı aralığı arasında ters orantı kurulmuş ve ± 0.29218 olan ve yük hücresi üreticisi tarafından sağlanan eski aralık, ± 0.34543 olarak düzeltilmiştir.

Algılayıcı aralığının değiştirilmesinden sonra deneyler tekrarlanmış ve Şekil 14'deki grafik elde edilmiştir. Sonuç olarak grafiğe ait eğim değeri

istenildiği gibi 1'e çok yakın çıkmıştır. Böylece eski değerinden daha küçük bulunan y-kesişim değerinin de deneyler öncesi tespit edilip bir sıfırlama işlemi ile deney verilerinden çıkarılmasıyla kuvvet verilerinin doğruluğu sağlanmıştır. Düzenleme sonrası yapılan ölçümlerde kuvvet verilerinde en fazla -0.25 N ile 0.43 N aralığında sapma olduğu gözlemlenmiştir.

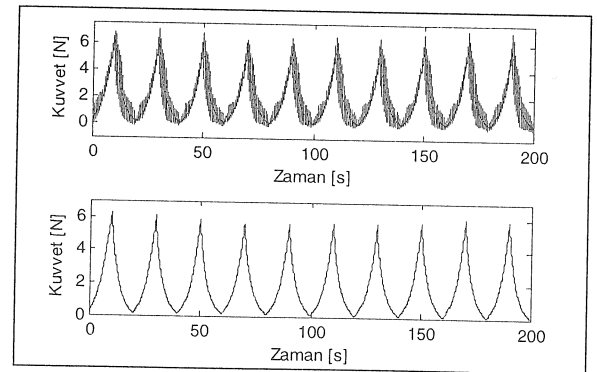


Şekil 14. Yük hücresi kalibrasyon denkleminin değiştirilmesi sonrasında elde edilen uygulanan yüke karşılık ölçülen kuvvet grafiği ve denklemi

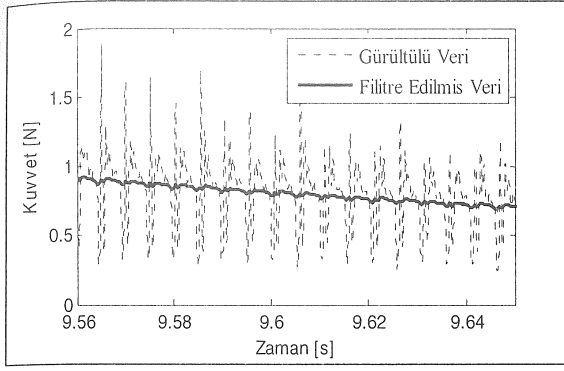
Yumuşak Doku Tepki Kuvveti Verilerinin Filtre Edilmesi:

Deney verileri özellikle adım motorunun üretmiş olduğu darbelere bağlı olarak gürültü içermektedir. Kuvvet verisinin toplanması ile adım motorunun çalışmasının eş zamanlı başlatılabilmesi için örnek toplama hızının belli bir sınıram üstünde tutulması gerekmektedir. Bu da deneyde gerekenden fazla veri toplanmasına ve veride ek gürültüye neden olmuştur.

Bu nedenle gürültülü verinin temizlenmesi için bir Matlab fonksiyonu olan sgolayfilt kullanılarak filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Savitzky-Golay yöntemiyle çalışan bu filtre kullanılarak Şekil 15 ve 16 da görülen sonuçlar elde edilmiştir [29].



Şekil 15. Üstteki grafikte 1 mm/s indenter hızı, 10 mm yer değiştirme ve 10 devir için yumuşak dokuda devirli yükleme deneyi ham tepki kuvveti sonucu görülmektedir. Altta aynı verinin filtre edilmesi sonucu elde edilen grafik görülmektedir.



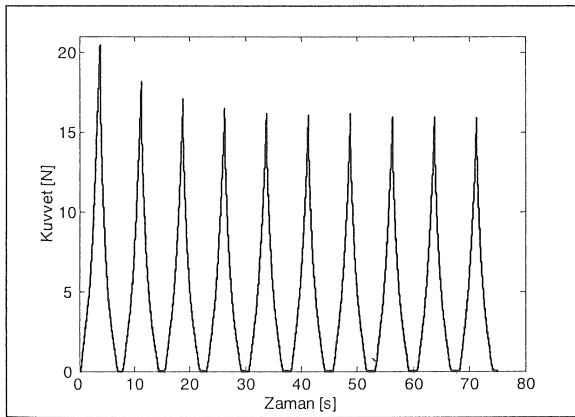
Şekil 16. Şekil 15'deki verinin yakınlaştırılmış görüntüsü

SONUÇLAR

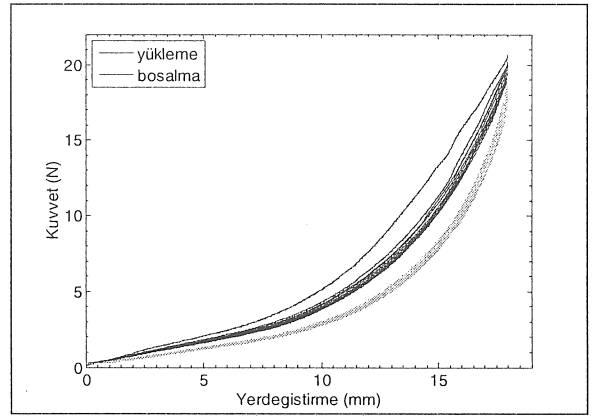
Bu çalışmada indentör deney cihazı kullanılarak üç farklı deney protokolü uygulanmıştır. Bunlar devirli yükleme, gevşeme ve sünme deneyleridir. Bu deneylerin gerçekleştirileceği bölge olarak ön kol seçilmiştir.

Devirli Yükleme Deneyleri

Devirli yükleme deneyleri indentör ucunun dokuyu istenen devir sayısında, motor hızında ve yer değiştirme miktarında yükleyip boşaltmasıyla gerçekleştirilen deneylerdir. Bu deneyler sonucunda iki grup veri elde edilir. Bunlar kuvvet-zaman (Şekil 17) ve kuvvet-yer değiştirme veri gruplarıdır (Şekil 18).



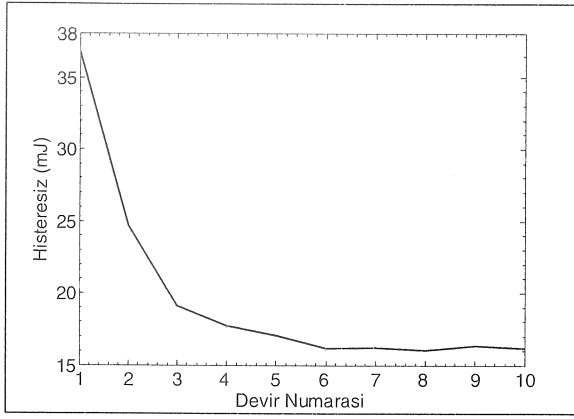
Şekil 17. Kuvvet-zaman veri grubu. Grafikte yumuşak dokuda oluşan alışma (Mullins) etkisi aynı yer değiştirme değerinde en yüksek yumuşak doku tepki kuvvetinin zaman içinde azalarak birbirini tekrar eder duruma gelmesi biçiminde görülebilir. Deney 4 mm/s motor hızı ve 14 mm yer değiştirme için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 18. Kuvvet-yer değiştirme veri grubu.

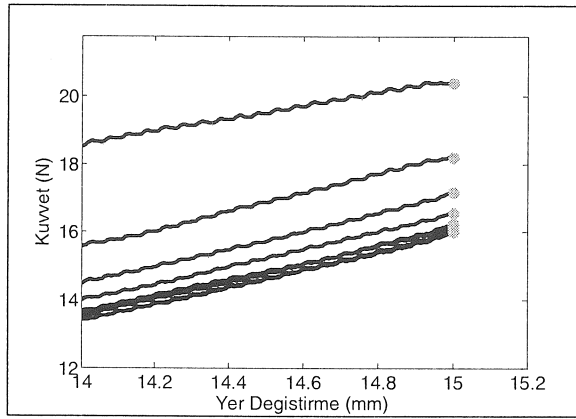
Kuvvet-zaman grafiklerinde gözlenebilen en önemli yumuşak biyolojik doku özelliği kuvvette görülen, zamana bağlı alışma (Mullins) etkisidir. Bu davranış dokunun direngenliğinin ilerleyen devir sayısı ile birlikte azalması ve belli bir devirden sonra sabitlenerek tekrar edilebilir duruma gelmesidir (Şekil 17).

Kuvvet-yer değiştirme grafikleri yumuşak biyolojik dokular hakkında daha ayrıntılı bilgi içermektedir ve yumuşak doku mekanik malzeme modeli (gerilme-gerinme-zaman bağıntısı) için özellikle evrik sonlu elemanlar yönteminde kullanılacak veriyi sunmaktadır [11, 30-32]. Bu grafiklerde doku deformasyonunun artışı sırasında elde edilen eğriler ile azalması sırasında elde edilen eğriler birbirinden ihmal edilemeyecek düzeyde farklıdır. Deformasyonun artışı sırasında elde edilen eğrinin altında kalan alan dokuyu deforme etmek için harcanan mekanik enerjiyi, deformasyon düzeldikçe elde edilen eğrinin altında kalan alan ise doku eski durumuna dönerken ondan elde edilen mekanik enerjiyi temsil etmektedir. İdeal elastik malzemeler için bu iki alan birbirine eşittir. Gerçek malzemelerin tümünde iç kayıplardan ötürü deforme etmek için kullanılan mekanik enerjinin tümü malzeme eski durumuna dönerken geri alınamaz ve mekanik enerjinin bir bölümü ısı enerjisine dönüşür. Mühendislik malzemelerinin önemli bölümünde kaybedilen mekanik enerji malzemeyi deforme etmek için kullanılan enerji ile karşılaştırıldığında genellikle ihmal edilebilir düzeyde olduğundan elastik malzeme modelleriyle gerçekçi bir temsil sağlanabilir. Yumuşak dokularda ise kaybedilen mekanik enerji ihmal edilemeyecek kadar büyüktür ve histeresiz olarak adlandırılır. Devirler sırasında kaybedilen mekanik enerji miktarına bakıldığında, ilk birkaç devirde daha büyük olduğu, sonrasında tekrar edilebilir kararlı bir değere ulaştığı yani alışma (Mullins) etkisi gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 19).



Şekil 19. Devir sayısına bağlı mekanik enerji kaybı (histeresiz) ve alışma (Mullins) etkisi

Şekil 17’de görülen alışma etkisi ile Şekil 19’da verilen alışma etkisi davranışı birbirleriyle ilintili olmakla birlikte aynı şey değildir. Şekil 17’de görülen alışma etkisinde noktasal bir veri olan en yüksek tepki kuvveti değerlendirilir. (Şekil 20).



Şekil 20. Şekil 17 de sonucu verilen deneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği. Yükleme eğrilerinin görüldüğü grafikte en yüksek kuvvet değerleri nokta olarak işaretlenmiştir.

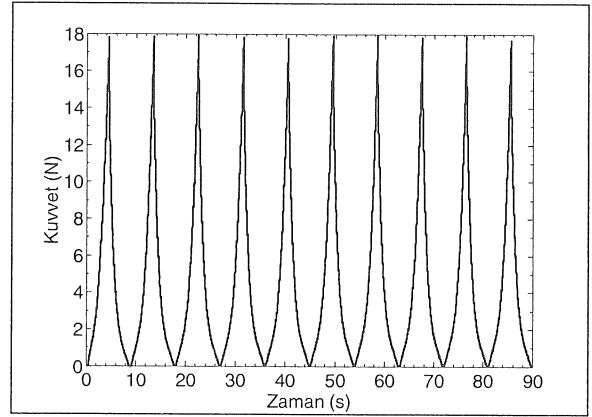
Ancak histerisizdeki alışma etkisinde kuvvet-yer değiştirme grafiklerinde yükleme ve boşalma eğrileri bir bütün olarak ele alınır ve aralarında kalan alan kullanılarak devirlerde kaybolan mekanik enerji hesaplanır. Bu bakımdan en yüksek tepki kuvveti ile bir devirde kaybedilen mekanik enerji miktarında gözlenen alışma etkileri birbirlerinden farklıdır. Bu nedenle Şekil 17’de verilen alışma etkisi kuvvetteki alışma etkisi, Şekil 19’da verilen alışma etkisi ise histeresiz büyüklüğündeki alışma etkisi olarak adlandırılmıştır.

İki kavram arasındaki fark aynı deney ölçümlerine ait kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme verilerinin alışma etkisi bakımından karşılaştırılması durumunda daha iyi görülmektedir.

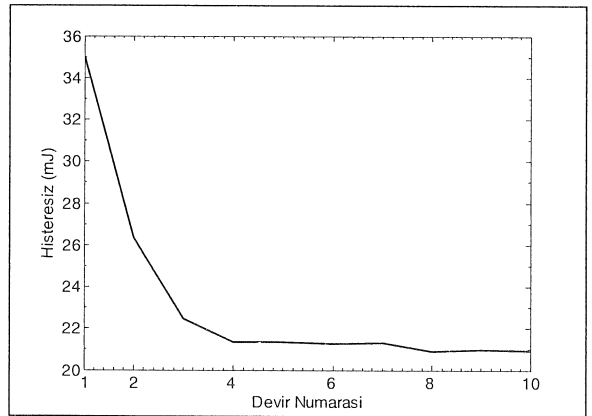
Kuvvet-zaman deney sonuçları göz önünde alındığında şu üç yargıya varılır:

- Şekil 17’de görülen ve alışma etkisinin elde edildiği veri,
- Alışma etkisinin gözlenmediği tüm en yüksek doku tepki kuvvetlerin hemen hemen eşit çıktığı veri (Şekil 21),
- En yüksek doku tepki kuvvetlerin iniş çıkışlar sergilediği veri olarak sıralanabilir.

Bu durumlara ait kuvvet-yer değiştirme grafiklerinde ise ilk iki durumda histeresiz büyüklüğüne bağlı alışma etkisi gözlenmektedir. Yani en yüksek doku tepki kuvvetinde herhangi bir düşüş olmasa bile (alışma etkisi gözlenmese bile) histeresiz büyüklüğüne bağlı bir alışma etkisi tespit edilmiştir (Şekil 22).



Şekil 21. Tüm en yüksek doku tepki kuvvetlerin hemen hemen eşit olduğu ve en yüksek kuvvette herhangi bir alışma etkisinin gözlenmediği devirli yükleme deneyi sonucu. Deney 4 mm/s motor hızı ve 18 mm yer değiştirme için gerçekleştirilmiştir.

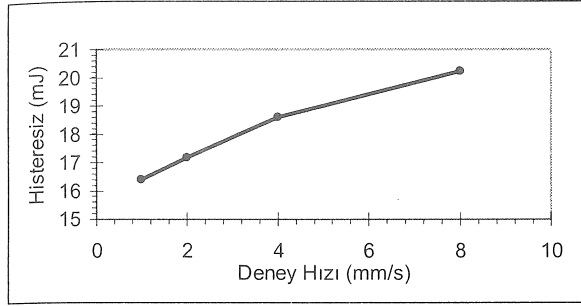


Şekil 22. Şekil 21 de verilen deneye ait histeresiz büyüklüklerinin devir numarası ile değişimi.

Histeresiz büyüklüğündeki alışma etkisi bu çalışma ile ortaya çıkan önemli bir bulgudur ve elde edilen kuvvet-zaman eğrilerinde herhangi bir alışma

etkisi gözlenmesi bile doku histerisiz büyüklüğünde alışma etkisi sergilemektedir. Bu bulgunun malzeme kanunu belirlenmesinde etkili olacağı umulmaktadır.

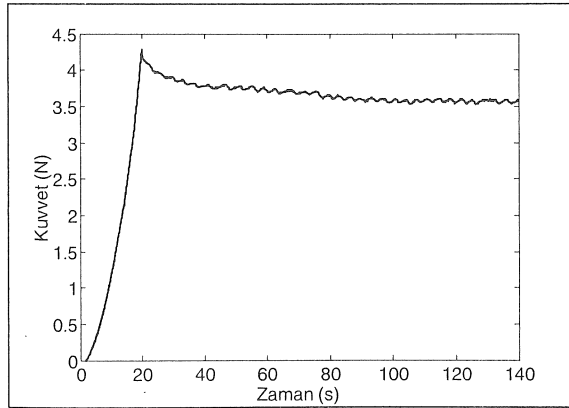
Histerisiz büyüklüğünün deney hızına bağımlılığına bakıldığında bu büyüklüğün artan deney hızı ile arttığı ancak bu artışın doğrusal viskoelastik malzemelerdeki kadar belirgin olmadığı ve Fung'un [9] ortaya attığı, hızdan bağımsız histerisiz kuramına da tam olarak uymadığı gözlenmiştir. (Şekil 23).



Şekil 23. Histerisiz büyüklüğünün hızla bağlı değişimi

Gevşeme Deneyleri

Gevşeme deneyleri dokunun istenen bir yer değiştirme miktarına kadar yüklenmesi ve bu yer değiştirme miktarında belirli bir süre boyunca tutulmasıyla gerçekleşir. Deney sonunda kuvvet-zaman grafiği elde edilir. İlk yükleme farklı hızlarda gerçekleştirilebilir. Bu deneylerde indentör ucunun dokuyu istenen miktarda yüklemesinin ardından doku tepki kuvvetinde belirgin bir düşüş gözlenmektedir (Şekil 24).



Şekil 24. Gevşeme deneyi sonucu elde edilen dokudaki gevşeme davranışı

Çalışmada çeşitli hız ve yer değiştirme değerlerinde yumuşak doku malzeme kanununun belirlenmesi için gevşeme deneyleri yapılmıştır.

Gevşeme deneylerinin modellenmesinde bir, iki ve üç terimli gevşeme formunda Prony serileri kullanılmıştır. Bu seriler Şekil 25'de gösterilen tek boyutlu mekanik malzeme modellerinin sabit yer değiştirme altında gevşeme davranışını modellemektedir. Prony serisindeki terim sayısı malzeme kanunu belirlenirken önemli olacaktır ve elde edilen katsayılar da malzeme katsayıları belirlenirken ilk kestirim değerleri olarak kullanılabilir. Kullanılan Prony serileri:

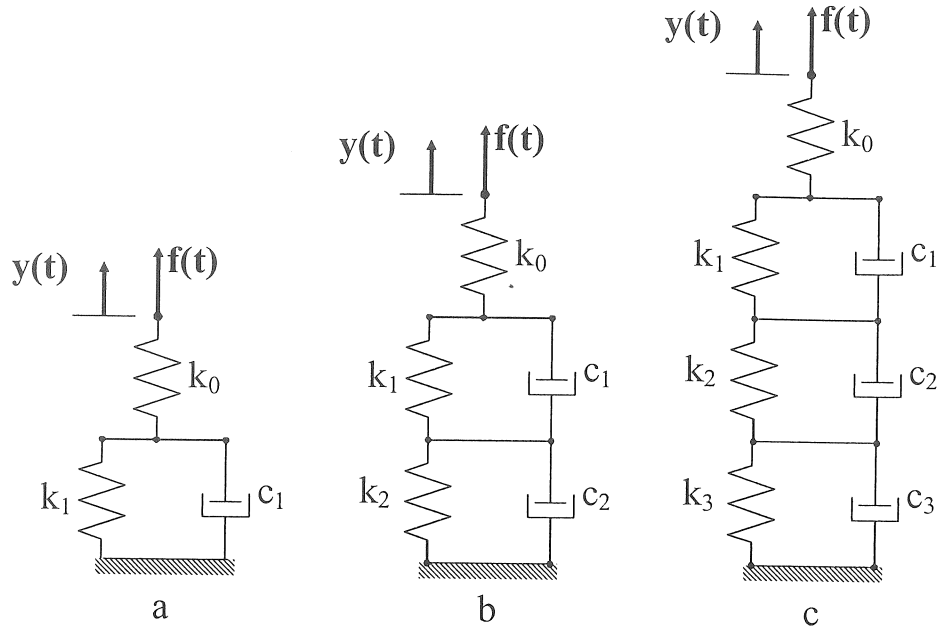
$$f(t) = f_0 [1 - \delta_1 (1 - e^{-t/\tau_1})] \quad (6)$$

$$f(t) = f_0 [1 - \delta_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) - \delta_2 (1 - e^{-t/\tau_2})] \quad (7)$$

$$f(t) = f_0 [1 - \delta_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) - \delta_2 (1 - e^{-t/\tau_2}) - \delta_3 (1 - e^{-t/\tau_3})] \quad (8)$$

Burada, $f(t)$ zaman içinde kuvvetin değişimi, f_0 gevşeme başlangıcındaki kuvvet, tek terimli Prony serisi için δ_1 toplam gevşeme oranı, τ_1 , gevşeme zaman sabiti (toplam gevşeme miktarı $f_0 \delta_1$), iki terimli Prony serisi için δ_1 kısa dönem gevşeme oranı, τ_1 , kısa dönem gevşeme zaman sabiti, δ_2 uzun dönem gevşeme oranı, τ_2 , uzun dönem gevşeme zaman sabiti (toplam gevşeme miktarı $f_0 (\delta_1 + \delta_2)$), üç terimli Prony serileri için, δ_1 kısa dönem gevşeme oranı, τ_1 , kısa dönem gevşeme zaman sabiti, δ_2 orta dönem gevşeme oranı, τ_2 , orta dönem gevşeme zaman sabiti, δ_3 uzun dönem gevşeme oranı, τ_3 , uzun dönem gevşeme zaman sabitidir (toplam gevşeme miktarı $f_0 (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)$).

Deney verileri kullanılarak yukarıda verilen Prony serilerinin katsayıları bir eğri uydurma işlemi ile bulunmuştur. Eğri uydurma işleminin sonucunda elde edilen katsayılar ve eğrinin deneysel veriye uyumunun göstergesi olan hata kareleri toplamı ile R^2 değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Deneysel veri ile Prony serileri tarafından elde edilen eğriler Şekil 26'da sunulmuştur. Tablo ve Şeklin incelenmesinden, tek terimli Prony serisinin 120 saniye süreli deneyi modellemekte yetersiz kaldığı, üç terimli Prony serisi için ise deneysel veride yeterli bilgi bulunmadığı anlaşılmaktadır. Bu durumda gevşeme verisi için, tek boyutlu, fiziksel, üç yay ve iki sönüm elemanından oluşan doğrusal viskoelastik malzeme modelinin (Şekil 25 b) malzeme kanunu için en iyi aday olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 25 Tek terimli (a), iki terimli (b) ve üç terimli (c) Prony serilerinin tek boyutlu fiziksel viskoelastik malzeme modelleri

Tablo 2 Deneysel gevşeme verisine uydurulan değişik sayıdaki terimli Prony serilerinin katsayıları (\pm değeri %95 güvenlik sınırını göstermektedir, * bulunan değerlerde %95 güvenlik sınırı çok büyüktür ve pratik bir anlamı yoktur)

terim sayısı	F_0 [N]	δ_1	τ_1 [s]	δ_2	τ_2 [s]	δ_3	τ_3 [s]	SSE	R^2
1	4.045 ± 0.005	0.1138 ± 0.0013	42.81 ± 0.96					1.36	0.9542
2	4.281 ± 0.014	0.06752 ± 0.0034	3.568 ± 0.384	0.1013 ± 0.0016	54.67 ± 3.87			1.137	0.9617
3	4.282 ± 0.015	0.06761 ± 0.0052	3.56 ± 0.51	0.0692*	54.69*	0.03214*	54.77*	1.135	0.9618

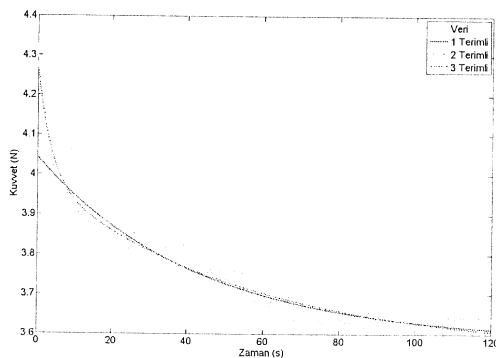
Tablo 3 Deneysel sünme verisine uydurulan değişik sayıdaki terimli Prony serilerinin katsayıları (\pm değeri %95 güvenlik sınırını göstermektedir, * bulunan değerlerde %95 güvenlik sınırı çok büyüktür ve pratik bir anlamı yoktur)

terim sayısı	y_0 [mm]	δ_1	τ_1 [s]	δ_2	τ_2 [s]	δ_3	τ_3 [s]	SSE	R^2
1	18.73 ± 0.01	0.03141 ± 0.0063	22.67 ± 0.93					4.789	0.8829
2	18.55 ± 0.02	0.02169 ± 0.00175	4.898 ± 0.751	0.02169 ± 0.00127	41.74 ± 5.71			3.661	0.9105
3	18.55 ± 0.02	0.02167 ± 0.0031	4.906 ± 1.028	0.02214 ± 0.00984	41.7 ± 28.2	0.03*	$1.058 \cdot 10^{5*}$	3.667	0.9103

Sünme Deneyleri

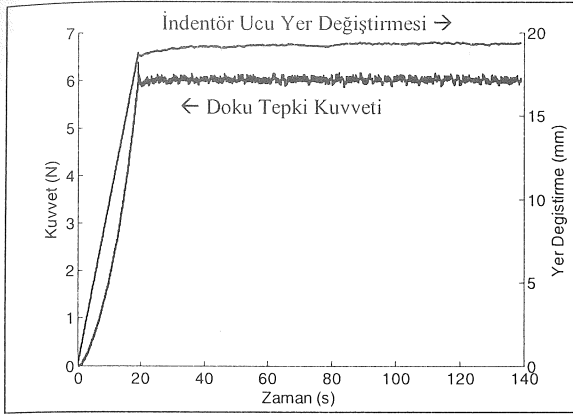
Sünme deneylerinde doku ilk olarak istenen bir tepki kuvveti değerine kadar yüklenir. Hedef kuvvete ulaşıldıktan sonra, kuvvet değeri oransal kapalı devre kontrol çevrimi kullanılarak sünme süresi boyunca sabit tutulur (Şekil 27).

Deney süresince kuvvet, yer değiştirme ve zaman verileri toplanır ve sünme davranışlarının gözlemlendiği yer değiştirme-zaman grafikleri elde edilir. Deneyler 1 mm/s yükleme hızında, farklı kuvvet değerleri ve 120 saniyelik sünme süresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 26. Gevşeme deney verisi ve değişik sayıdaki Prony serileri ile modellenmesi

Sünme deneyleri de yumuşak doku malzeme kanununun belirlenmesine yönelik önemli bilgiler içerir.



Şekil 27. 6 N hedef kuvvet belirlenerek gerçekleştirilmiş deneye ait kuvvet – zaman ve yer değiştirme – zaman grafiği.

Sünme deneylerinde modelleme için gevşeme deneylerinde olduğu gibi bir, iki ve üç terimli Prony serileri kullanılmıştır ve bu seriler Şekil 25'te gösterilen üç fiziksel viskoelastik malzeme modelinin sünme tepkisini temsil etmektedir.

$$y(t) = y_0 \left[1 + \delta'_1 (1 - e^{-t/\tau'_1}) \right] \dots \dots \dots (9)$$

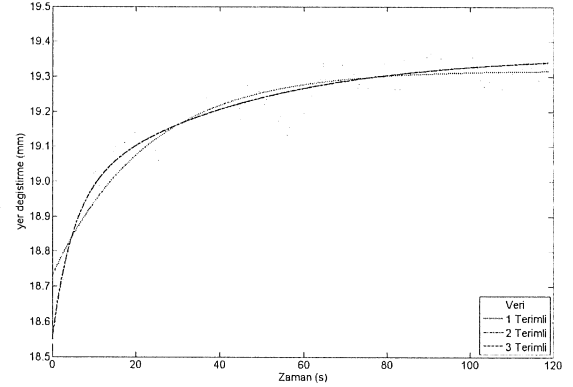
$$y(t) = y_0 \left[1 + \delta'_1 (1 - e^{-t/\tau'_1}) + \delta'_2 (1 - e^{-t/\tau'_2}) \right] \dots \dots \dots (10)$$

$$y(t) = y_0 \left[1 + \delta'_1 (1 - e^{-t/\tau'_1}) + \delta'_2 (1 - e^{-t/\tau'_2}) + \delta'_3 (1 - e^{-t/\tau'_3}) \right] \dots \dots \dots (11)$$

Burada, $y(t)$ zaman içinde yer değiştirme, y_0 sünme başlangıcındaki yer değiştirme, tek terimli Prony serisi için δ'_1 sünme oranı, τ'_1 sünme zamanı sabiti (toplam sünme miktarı $y_0 \delta'_1$), iki terimli Prony serisi için δ'_1 kısa dönem sünme oranı, τ'_1 kısa dönem sünme zaman sabiti, δ'_2 uzun dönem sünme oranı, τ'_2 uzun dönem sünme zaman sabiti (toplam sünme miktarı $y_0 (\delta'_1 + \delta'_2)$), üç terimli Prony serisi için, δ'_1 kısa dönem sünme değeri, τ'_1 kısa dönem sünme zaman sabiti, δ'_2 orta dönem sünme oranı, τ'_2 orta dönem sünme zaman sabiti, δ'_3 uzun dönem sünme oranı, τ'_3 uzun dönem sünme zaman sabitidir (toplam sünme miktarı $y_0 (\delta'_1 + \delta'_2 + \delta'_3)$).

Deney verileri kullanılarak yukarıda verilen Prony serilerinin katsayıları bir eğri uydurma işlemi ile bulunmuştur. Eğri uydurma işleminin sonucunda elde edilen katsayılar ve eğrinin deneysel veriye uyumunun göstergesi olan hata kareleri toplamı ile R^2 değerleri Tablo 3'te sunulmuştur. Deneysel veri ile

Prony serileri tarafından elde edilen eğriler Şekil 28'de sunulmuştur. Tablo ve Şeklin incelenmesinden, tek terimli Prony serisinin 120 saniye süreli deneyi modellemekte yetersiz kaldığı, üç terimli Prony serisi için ise deneysel veride yeterli bilgi bulunmadığı anlaşılmaktadır. Bu durumda gevşeme verisinde olduğu gibi sünme verisi için de, tek boyutlu, fiziksel, üç yay ve iki sönüm elemanından oluşan doğrusal viskoelastik malzeme modelinin (Şekil 25 b) malzeme kanunu için en iyi aday olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 28. Sünme deney verisi ve değişik sayıdaki Prony serileri ile modellenmesi

TARTIŞMA VE SONUÇ

İnsan bedeninin çevre ile mekanik etkileşiminin modellenmesine yönelik ilk adım olan bu çalışmaya indentör deney cihazındaki doku tepki kuvveti ölçüm hassasiyeti ve indentör ucu konum hassasiyetinin artırılmasına yönelik iyileştirmeler yapılmasıyla başlanmıştır. İndentörün dokuya daha iyi bağlanabilmesi ve belirsiz ön-gerilmelerden arındırılması için sabitleme aparatı tasarlanıp üretilmiştir. Ancak dokuda bulunan belirsiz fizyolojik ön-gerilmeler hala mevcuttur. Uygun filtre yardımıyla indentör ucu tepki kuvveti verisi gürültüden arındırılmıştır.

Yumuşak doku mekanik davranışını daha iyi anlayabilmek için üç farklı deney protokolü kullanılarak değişik yumuşak biyolojik doku davranışları incelenmiştir. Devirli yükleme deney sonuçları kullanılarak dokunun gösterdiği alışma (Mullins) etkisi ve farklı hızlardaki mekanik yanıtı incelenmiştir. Alışma etkisi kuvvet ve histeresiz büyüklüklerinde gözlenmiştir. Histeresiz büyüklüğünde görülen alışma etkisi bu çalışma sonucu ortaya çıkan yeni bir kavramdır ve kullanılabilen tepki kuvvetinin en büyük değerinden daha fazla bilgi içerdiği düşünülmektedir. Yine histeresiz büyüklükleri kullanılarak dokunun farklı hızlardaki yanıtı incelenmiş, artan hızla birlikte histeresiz miktarının Fung'un [9] gözlemlerinin aksine arttığı ancak bu artışın klasik viskoelastik

malzeme modellerindeki kadar belirgin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Gevşeme ve sünme deneyleri yapılarak yumuşak biyolojik dokuların malzeme kanununun belirlenmesine yönelik ek bilgiler elde edilmiştir [30-32].

Böylece yumuşak biyolojik dokular için şimdiye kadar bilinen ve kullanılan malzeme modellerinden daha ayrıntılı ve gerçekçi modellerin çıkarılması ve ilgili malzeme sabitlerinin gerektiğinde kişiye özel olarak belirlenmesiyle [30] endüstrinin birçok alanında kullanılan bilgisayar destekli tasarım, ve bilgisayar destekli yapısal analiz (özellikle sonlu elemanlar yöntemi) insan bedeninin neredeyse tamamını kaplayan yumuşak biyolojik dokuların çevre ile mekanik etkileşimini içeren çalışmalarda da etkin bir şekilde kullanılabilir. Tasarım sürecinde zaman ve para tasarrufu sağlanacağı, daha kaliteli tasarımlar yapılabileceği, özellikle protez, ortez, yatak, koltuk, ayakkabı ile insan bedeni arasındaki mekanik etkileşimlerde bugüne kadar süregelen problemlerin çözümüne katkıda bulunacağı umulmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan deney sistemi ilk olarak TÜBİTAK MİSAG-183 projesi kapsamında üretilmiştir. İlk yazar TÜBİTAK yurtiçi yüksek lisans bursiyeridir. Yazarlar, indentör sistemi için indentör cihazı sabitleme aparatını özenle üreten Birant Makina'dan Makina Mühendisi Sayın Emir Birant'a teşekkür eder.

IN VIVO INDENTER EXPERIMENTS TO MODEL MECHANICAL BEHAVIOR OF SOFT TISSUES

Abstract: Soft biological tissues possess relatively complex mechanical responses when compared to classical engineering materials. The first step to reveal the mechanical response and the constitutive law of soft biological tissues is to perform extensive systematic experiments. Although there exists various procedures to perform soft tissue mechanical tests, since it is aimed to model the mechanical interaction of human body with the environment, *in-vivo* indenter experiments were selected. The existing soft tissue indenter was improved in terms of displacement accuracy and repeatability, and, soft tissue reaction force measurement. The filtering procedure of soft tissue reaction force data was improved as well. A new device was designed and constructed to improve the connection of the device to soft tissue. Cyclic loading, relaxation and creep experiments were performed on the forearm bulk soft tissues. The preconditioning effect and hysteresis under different loading conditions were analyzed. It was concluded that forearm soft tissue material presented relaxation and creep, preconditioning

(Mullins) effect, has considerable hysteresis. By using the results of the relaxation and creep tests, parameters of the Prony series containing different number of terms, capable of modeling these data were determined. It is expected that the obtained data will be useful in determining the constitutive law of soft biological tissues.

Keywords: Soft Biological Tissues, Material Properties Characterization, Mechanical Test, In-vivo Indenter Tests, Viscoelasticity, Preconditioning (Mullins) Effect, Prony Series

KAYNAKÇA

- [1] Manduca, A., Oliphant, T.E., Dresner, M.A., Mahowald, J.L., Kruse, S.A., Amromin, E., Felmlee, J.P., Greenleaf, J.F., Ehman, R.L., *Magnetic resonance elastography: Non-invasive mapping of tissue elasticity*, Medical Image Analysis, vol. 5, pp. 237-254, 2001.
- [2] Lawrence, A.J., Rossman, P.J., Mahowald, J.L., Manduca, A., Hartmann, L.C., Ehman, R.L., *Palpating Breast Cancer by Magnetic Resonance Elastography*, Proceedings of the 7th Annual Meeting of ISMRM, Philadelphia, p. 215, 1999.
- [3] Geyer, M. J., Brienz, D. M., Chib, V., Wang, J., *Quantifying Fibrosis in Venous Disease: Mechanical Properties of Lipodermatosclerotic and Healthy Tissue*, Advances Skin & Wound Care, vol. 17, pp. 131-142, 2004.
- [4] Gefen, A., Megido-Ravid, M., Azariah, M., Itzchak, Y., Arcan, M., *Integration of Plantar Soft Tissue Stiffness Measurements in Routine MRI of the Diabetic Foot*, Clinical Biomechanics, vol. 16, pp. 921-925, 2001.
- [5] Kirk, E., Kvorning, S. A., *Quantitative Measurements of the Elastic Properties of the Skin and Subcutaneous Tissue in Young and Old Individuals*, Journals of Gerontology, vol. 4, pp. 273-284, 1949.
- [6] Sokolof, L., *Elasticity of aging cartilage*, Federation Proceedings, vol. 25, pp. 1089-1095, 1966.
- [7] Zheng Y. P., Mak A. F. T., Lue B. K., *Objective assessment of limb tissue elasticity: development of a manual indentation procedure*, Journal of Rehabilitation Research and Development, vol. 36, pp. 71-85, 1999.
- [8] Miller, K., *How to test very soft biological tissues in extension?*, Journal of Biomechanics, vol. 34, pp. 651-657, 2000.
- [9] Fung, Y. C., *Structure and Stress-Strain Relationship of Soft Tissues*, American Zoologist, vol. 24, pp. 13-22, 1984.

- [10] Petekkaya, A. T., Tönük, E. T., *İndentör Deneyleri ile Yumuşak Biyolojik Dokuların Anizotropik Mekaniik Davranışının Yerinde Belirlenmesi*, Biyomut 2008, 13. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, Ankara, 29-31 Mayıs 2008.
- [11] Tönük, E., Silver-Thorn, M. B., *Nonlinear viscoelastic material property estimation of lower extremity residual limb tissues*, Journal of Biomechanical Engineering, vol. 126, pp. 289-300, 2004.
- [12] Kroon, M., Holzapfel, G. A., *A new constitutive model for multi-layered collagenous tissue*, Journal of Biomechanics, doi: 10.1016/j.jbiomech.2008.05.033, 2008.
- [13] Peña, E., et al., *On modelling nonlinear viscoelastic effects in...*, Journal of Biomechanics, doi: 10.1016/j.jbiomech.2008.06.019, 2008.
- [14] Ottensmeyer, M. P., Kerdok, A. E., Howe, R. D., Dawson, S. L., *The Effects of Testing Environment on the Viscoelastic Properties of Soft Tissues*, International Symposium on Medical Simulation, pp. 9-18, 2004.
- [15] Gefen, A., Margulies, S. S., *Are in vivo and in situ brain tissues mechanically similar?*, Journal of Biomechanics, vol. 37, pp. 1339-1352, 2003.
- [16] Tanaka, E., Tanaka, M., Aoyama, J., Watanabe, M., Hattori, Y., Asai, D., Iwabea, T., Sasaki, A., Sugiyama, M., Tane, K., *Viscoelastic properties and residual strain in a tensile creep test on bovine temporomandibular articular discs*, Archives of Oral Biology, vol. 47, pp. 139-146, 2002.
- [17] Prete, Z. D., Antonucci, S., Hoffman, A. H., Grigg, P., *Viscoelastic properties of skin in Mov-13 and Tsk mice*, Journal of Biomechanics, vol. 37, pp. 1491-1497, 2004.
- [18] Miller, K., Chinzei, K., *Mechanical properties of brain tissue in tension*, Journal of Biomechanics, vol. 35, pp. 483-490, 2002.
- [19] DiSilvestro, M. R., Suh, J. F., *A cross-validation of the biphasic poroviscoelastic model of articular cartilage in unconfined compression, indentation, and confined compression*, Journal of Biomechanics, vol. 34, pp. 519-525, 2001.
- [20] Ottensmeyer, M. P., *In Vivo Measurement of Solid Organ Tissue Mechanical Properties*, Studies in Health Technology and Informatics, vol. 85, pp. 328-333, 2002.
- [21] Petekkaya, A. T., *In Vivo Indenter Experiments on Soft Biological Tissues for Identification of Mechanical Material Model and Corresponding Parameters*, M.S. Thesis, Middle East Technical University, 2008.
- [22] Payne, P. A., *Measurement of Properties and Function of Skin*, Clinical Physics and Physiological Measurement, vol. 12(2), pp. 105-129, 1991.
- [23] Alexander, H., Cook, T. H., *Accounting for natural tension in the mechanical resting of human skin*, The Journal of Investigative Dermatology, vol. 69, pp. 310-314, 1977.
- [24] Valtorta, D., Mozza, E., *Dynamic measurement of soft tissue viscoelastic properties with a tensional resonator device*, Medical Image Analysis, vol. 9, pp. 481-490, 2005.
- [25] Yin, Y., Ling, S., Liu, Y., *A dynamic indentation method for characterizing soft incompressible viscoelastic materials*, Materials Science and Engineering, vol. 379, pp. 334-340, 2004.
- [26] Korhonen, R. K., Saarakkala, S., Töyräs, J., Laasanen, M. S., Kiviranta, I., Jurvelin, J. S., *Experimental and numerical validation for the novel configuration of an arthroscopic indentation instrument*, Physics in Medicine and Biology, vol. 48, pp. 1565-1576, 2003.
- [27] Choi, A. P. C., Zheng, Y. P., *Estimation of Young's modulus and Poisson's ratio of soft tissue from indentation using two different sized indenters: finite element analysis of the finite deformation effect*, Medical & Biological Engineering & Computing, vol. 43, pp. 258-264, 2005.
- [28] Tönük, E., *Dizaltı Ampute Yumuşak Doku Mekanik Özelliklerinin Araştırılması için Deney Cihazı Tasarımı ve Üretimi*. Makina Tasarım ve İmalat Dergisi Cilt 5, Sayı 1, 42-49, Mayıs 2003.
- [29] The MathWorks, *Data Acquisition Toolbox*, http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/signal/index.html?access/helpdesk/help/toolbox/signal/sgolayfilt.html&http://www.mathworks.com/cgi-bin/txis/webinator/search/?db=MSS&prox=page&rorder=750&rprox=750&rdfreq=500&rwfreq=500&rlead=250&sufs=0&order=r&is_summary_on=1&ResultCount=10&query=sgolayfilt, son giriş tarihi: 15/11/2008.
- [30] Üsü, K., *Identification Of Soft Tissue Mechanical Material Model And Corresponding Parameters From In Vivo Experimental Data By Using Inverse Finite Element Method*, M.S. Thesis, Middle East Technical University, 2008.
- [31] Üsü, K., Tönük, E., *Yumuşak Doku Bünye Denklemleri I: Sanki-Doğrusal Viskoelastik Model*, 13. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, Ankara, 29-31 Mayıs 2008.
- [32] Üsü, K., Tönük, E., *Yumuşak Doku Bünye Denklemleri II: Geliştirilmiş Sanki-Doğrusal Viskoelastik Model*, 13. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, Ankara, 29-31 Mayıs 2008.

Yerinde-Canlı İndentör Deneylerinden Elde Edilen Yumuşak Doku Mekanik Davranışını Modellemek için Sanki- Doğrusal Viskoelastik Malzeme Modelleri

Kerem Üsü

Makina Yüksek Mühendisii
Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ankara

Ergin Tönük

Y. Doç. Dr.
Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Ankara

Bu çalışmanın amacı yumuşak biyolojik dokuların farklı deney protokollerindeki mekanik davranışlarını sanki-doğrusal viskoelastik malzeme modeli kullanarak mümkün olan en az malzeme sabiti değişimi ile bilgisayarda andırmaktır. Yumuşak dokular doğrusal olmayan gerilim-gerinim davranışı, gevşeme, sünme, histeris ve alışma (Mullins etkisi) gibi alışlageldik mühendislik malzemelerinden farklı tepkiler verirler. Yumuşak dokular modelleme amaçlı olarak genellikle sanki-elastik veya viskoelastik kabul edilirler.

Bu çalışmada, indentör deneyleri sonucunda elde edilen yumuşak doku yer değiştirme-tepki kuvveti-zaman verileri kullanılarak deney bölgesi ve yakın çevresinin, sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Yumuşak doku malzeme modeli olarak viskoelastik malzeme modeli, rastgele başlangıç katsayıları ile kullanılmış, evrik sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla sonlu elemanlar andırımındaki yumuşak doku yer değiştirmesi-tepki kuvveti-zaman sonuçları deneysel sonuçlarla arzu edilen yakınlığa ulaşmaya kadar malzeme katsayıları değiştirilmiştir. Andırım sonuçları, deneysel gevşeme ve sünme davranışlarını sırasıyla % 0.74 ve % 0.31 normalize edilmiş hata kareleri toplamı değerleriyle modellemiştir. Bu değerler, kullanılan malzeme modelinin yumuşak biyolojik doku davranışının kestirimine uygun olduğunu ve elde edilen malzeme katsayılarının yumuşak dokuyu istenen hassasiyette temsil ettiğini göstermektedir. İndentör deney sonuçları ve burada sunulan yöntem kullanılarak insan bedeninin çevre ile mekanik etkileşimi kişiye ve dokuya özel olacak biçimde ve hassas olarak modellenebilir.

Anahtar Kelimeler: Yumuşak doku, viskoelastisite, evrik sonlu elemanlar modeli.

GİRİŞ

İnsan bedeninin dışı büyük ölçüde yumuşak dokulardan oluşmuştur ve dolayısıyla bedenin çevre ile fiziksel temasların çoğu bu yumuşak dokular aracılığıyla gerçekleştirilir. Örneğin, kalça üzerine oturulur ve zamanla kalça oturulan zeminin şeklini alır, en ufak bir kıpırdanma sonucu tekrar şekil değiştirir ve yeni pozisyonuna adapte olmaya çalışır; uzun yürüyüşler sonucunda vücut ağırlığından dolayı ayak tabanlarına uygulanan periyodik değişen kuvvetler sonucu çeşitli yumuşak doku zedelenmeleri

meydana gelebilir ve ağrı hissedilebilir. Felçli hastaların uzun süre hareketsiz yatmaları sonucu vücutlarıyla yatağın temas ettiği yerlerde yatak yaraları meydana gelir. Protez veya ortez kullanan kişiler bunların vücutlarıyla uyumsuzluklarından dolayı oluşan yaralardan şikayet ederler.

İnsan vücudunda olan bu fiziksel etkileşimlerin mekanik sonuçlarının doğru olarak kestirilebilmesi için öncelikle bu etkileşimleri gerçekleştiren yumuşak dokuların mekanik davranışları hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Bunların, çeşitli kuvvet tip

ve büyüklüklerine nasıl tepki vereceği mümkün olduğu kadar ayrıntılı ve doğru bilinmelidir.

Yumuşak dokuların hangi kuvvete ne şekilde tepki vereceği deneylerle belirlenir. Bu deneyler *ex vivo*, *in vitro* ve *in vivo* (yerinde canlı) olmak üzere üç şekilde yapılır [25].

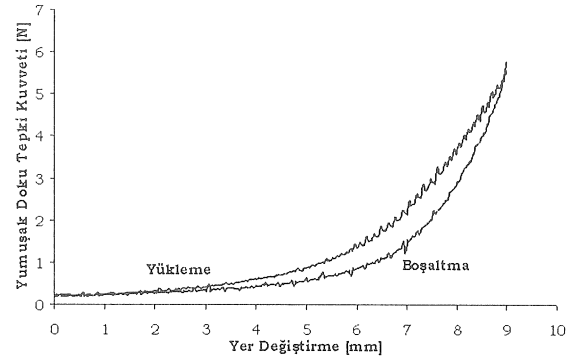
Ex vivo deneylerde, yumuşak doku yerine benzer özellikler gösteren polimer ve benzeri malzemeler kullanılır. Dolayısıyla doğru sonuca en uzak deney tipidir. Bunun yanında bilindik geometrilere sahip numuneler kullanılarak deneyin yapılışı kolaylaştırılabilir. *In vitro* deneylerde ise çevresinden kesilip alınmış gerçek ama ölü yumuşak dokular kullanılır. Dokunun gerçek ortamında (vücudun bir parçası olarak) bulunmaması ve canlı olmaması mekanik özelliklerinin değişmesine sebep olur. Sonuçları *ex vivo* deneylere göre daha gerçekçi olsa da tatmin edici değildir. Son olarak bu çalışmada faydalanılan *in vivo* deneyler yumuşak doku kendi ortamında ve canlı haldeyken yapılır. Dolayısıyla, canlı dokunun kendi biyolojik çevresindeki mekanik davranışı hakkında en doğru bilgiler *in vivo* deneyler sonucu elde edilir. Bu deneylerin en büyük sakıncası ise dokuların karmaşık geometrisinden dolayı uygulanmalarının zor olması ve malzeme yavaşını elde etmek için gerilme-gerinme-zaman bağıntılarının elde edilmesi için ek işlemlere gereksinim duymasıdır.

Yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler, yumuşak doku mekanik özelliklerini modelleyen ve genellikle doğrusal olmayan karmaşık matematiksel denklemlerin katsayılarının bulunmasında kullanılmaktadır.

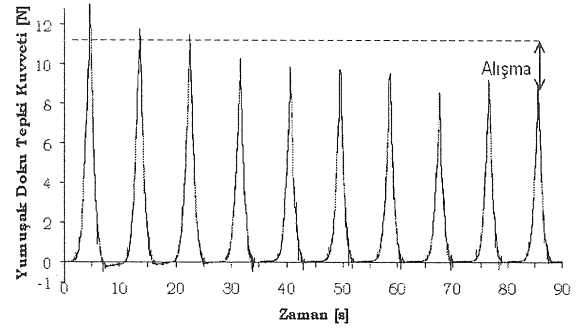
YUMUŞAK DOKU MEKANİK MALZEME MODELLERİ

Yumuşak dokular üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucu, onların genel olarak şu mekanik özellikleri gösterdiği gözlenmiştir:

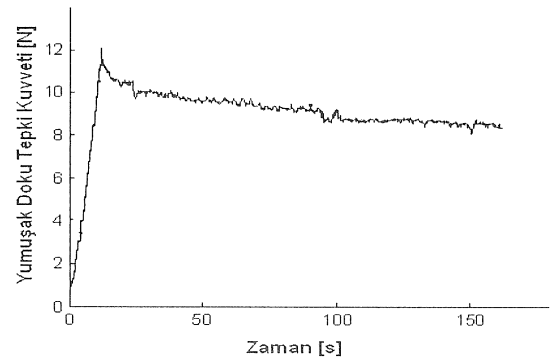
1. Mekanik davranışları büyük yer değiştirme ve büyük gerinmeler altında doğrusal elastik malzeme davranışından önemli oranda sapmaktadır (Şekil 1).
2. Belirgin bir alışma davranışı (Mullins etkisi) sergilerler (ilk birkaç yüklemenin, daha sonra gelen ve tekrarlanabilen yüklemelerden sapması) (Şekil 2).
3. Sabit deformasyon altında tutulduğunda yumuşak dokunun gösterdiği tepki kuvveti zamanla azalmaktadır (gevşeme) (Şekil 3).
4. Sabit yük altında tutulduğunda yumuşak dokuda meydana gelen deformasyon zamanla artmaktadır (sünme) (Şekil 4).



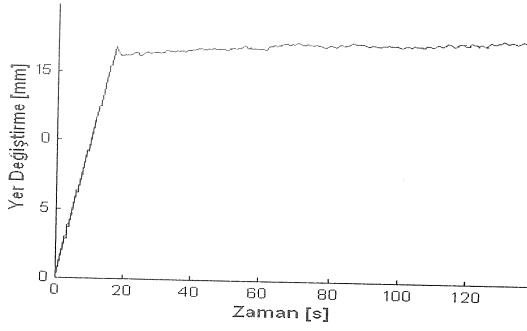
Şekil 1. Yumuşak Doku Devirli Yükleme Deneyinde Bir Devir Sunucu Elde Edilen Veri



Şekil 2. Yumuşak Doku Alışma Deneyi



Şekil 3. Yumuşak Doku Gevşeme Deneyi



Şekil 4. Yumuşak Doku Sünme Deneyi

Yumuşak dokuların bu özelliklerini mümkün olabildiğince az katsayılı ve fazla karmaşık olmayan matematiksel denklemlerle modelleyebilmek yıllardır süregelen biyomekanik araştırmaların amacıdır. Bunun için çeşitli yöntemler denenmiştir. Bunlardan bazıları; derinin modellenmesi [2, 16, 18], üst ve alt bacağın modellenmesi [3, 4], atardamarların modellenmesi [5, 17, 18], kalp kapakçığının modellenmesi [6], akciğer dokusunun modellenmesi [7, 18], ayak tabanının modellenmesi [8], eklem kırırdağının modellenmesi [9], bağların modellenmesi [10, 11, 15], göğüs dokusunun modellenmesi [12, 13] ve karaciğer dokusunun modellenmesi [14] olarak gösterilebilir.

Bu modellemeler sırasında, aşağıda değinilen başlıca iki yaklaşım kullanılmıştır.

1. Psödoelastik Model Yaklaşımı

Şekil 1'de görüldüğü gibi yumuşak dokular yükleme ve boşaltma hareketlerinde farklı eğrilerle temsil edilirler. Tek bir döngü esnasında bu iki eğri arasında oluşan alan *histeris* olarak tanımlanır ve dokuların elastik olmadığını kanıtlar (elastik malzemelerde yükleme ve boşaltma hareketleri tek eğri ile ifade edilir ve yükleme boşaltma döngüsünde mekanik enerji kaybı yoktur).

Psödoelastik modellemenin temeli, bu iki eğriyi ayrı ayrı ele almaya dayanır. Böylece iki farklı elastik malzeme varmış gibi düşünülüp elastisite teorileri kullanılarak mekanik davranış modellenir.

Psödoelastik modellemenin en büyük avantajı, denklemlerin gerinme hızından bağımsız olmasıdır. Literatürde bulunan, farklı yumuşak dokular için önerilmiş sanki-elastik gerinme enerjisi fonksiyonlarından birkaçı sunulmaktadır.

Vaishnav [17] tarafından kullanılan gerinme enerjisi fonksiyonu damarlar gibi silindirik yapılar içindir, silindirik koordinat sisteminde ifade edilmiştir ve bir polinom biçimindedir:

$$\rho_0 W = A E_{\theta\theta}^2 + B E_{\theta\theta} E_{zz} + C E_{zz}^2 + D E_{\theta\theta}^3 + E E_{\theta\theta}^2 E_{zz} + F E_{\theta\theta} E_{zz}^2 + G E_{zz}^3 \quad (1)$$

Burada A, B, C, D, E, F ve G malzeme sabitleri olup deneysel verinin fonksiyon tarafından kestirilen davranışa uyumunu sağlayacak biçimde belirlenir.

Akciğer özektokusu için Hoppin [7] tarafından önerilen fonksiyon ise aşağıda sunulmuştur:

$$\rho_0 W = \sum_{i=1}^4 a_i (\lambda_1^{2i} + \lambda_2^{2i} + \lambda_3^{2i}) + \sum_{i=1}^2 b_i (\lambda_1^{2i} \lambda_2^{2i} + \lambda_2^{2i} \lambda_3^{2i} + \lambda_1^{2i} \lambda_3^{2i}) + c_1 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \sum_{i=2}^3 c_i (\lambda_1^{2i} \lambda_2^{2i} + \lambda_2^{2i} \lambda_3^{2i} + \lambda_3^{2i} \lambda_1^{2i} + \lambda_1^{2i} \lambda_2^{2i} + \lambda_2^{2i} \lambda_3^{2i} + \lambda_3^{2i} \lambda_1^{2i}) \quad (2)$$

Burada a_i, b_i ve c_i malzeme sabitleridir ve fonksiyon genel bir üç boyutlu gerilme durumu için geçerlidir.

Mezenter ve kaslar için önerilen gerinme enerjisi fonksiyonu [26, 27] şöyledir:

$$\rho_0 W = \frac{dT}{dE} \alpha T + \beta \sqrt{2} \quad (3)$$

Burada T birim alandaki çekme kuvveti, E gerinme, α ve β ise malzeme sabitleridir. Bu denklem gerilmesiz duruma çok yakın durumlar için iyi sonuç vermese de diğer tüm gerilmelerde istenen hassasiyette kestirim yapabilmektedir.

Alt ekstremitte yumuşak dokularının modellenmesi için Tönük [28] tarafından kullanılmış olan James-Green-Simpson modelinin aksel simetrik ve sıkıştırılmaz malzemelere uygulanmış tipi şu şekildedir:

$$W = C_1 (I-3) + C_2 (I-3)^2 + C_3 (I-3)^3 \quad (4)$$

Burada I sıkıştırılmaz malzeme için aksel simetrik Green-Lagrange gerinme tensörünün tek bağımsız değişmezi, C_i ise malzeme sabitleridir.

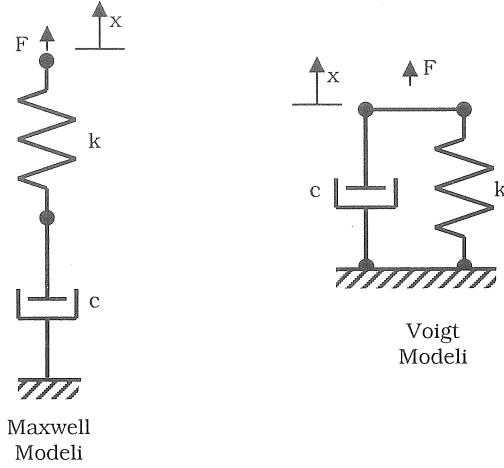
Her doku ve her yükleme tipi ve hızı için ayrı bir psödo-elastik gerinme enerjisi fonksiyonunun oluşturulmasının gerekliliği, basit ve az katsayılı denklem oluşturma çalışmalarına ters düşmektedir. Bu sebeple, daha genel denklemler aracılığıyla yumuşak doku modellenmesine imkan veren viskoelastik malzeme modelleri geliştirilmiştir.

2. Viskoelastik Model Yaklaşımı

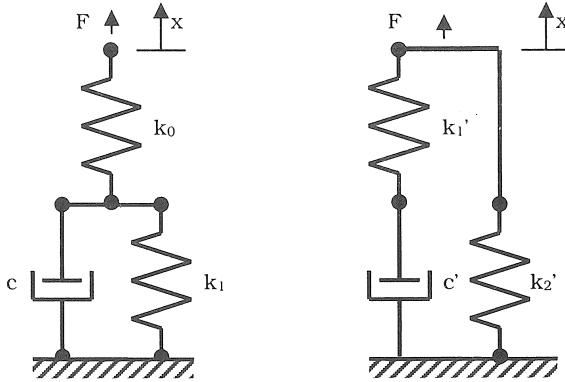
Viskoelastik malzemeler katularla ağıdalı sıvıların özelliklerini bir arada gösteren malzemelerdir. Bu malzemeler, katı veya sıvı özelliklerinin baskınlığına göre katıya daha yakın veya sıvıya daha yakın davranabilirler [25]. Viskoelastik malzeme mekanik davranışı yumuşak doku mekanik davranışına çok benzemektedir. Yumuşak dokular gibi histeris (Şekil 1), gevşeme (Şekil 3) ve sünme (Şekil 4) gibi tipik davranışları sergilerler.

En temel iki tip viskoelastik malzeme modeli Maxwell ve Voigt modelleri olup tek boyutlu

mekanik model olarak Şekil 5'deki gibi gösterilebilir. Burada yay, elastik davranışı; amortisör ise ağıdalı davranışı temsil etmektedir. Maxwell modeli viskoelastik akışkanları modellemekte uygundur. Voigt modelinin tepkisi gerçek viskoelastik katılarla uyumadığı için en basit viskoelastik katı modeli için üç elemanlı (bazen Kelvin modeli olarak anılır) model (Şekil 6) önerilmiştir [25].



Şekil 5. Temel Viskoelastik Malzeme Modellerinin Tek Boyutlu Mekanik Modelleri



Şekil 6. Üç Elemanlı (Kelvin) Viskoelastik Malzeme Modelinin İki Farklı Gösterimi

Üç elemanlı modelde gerçek viskoelastik katılarda görülen anlık elastik yanıt görülebilmektedir. Bu modellerde gevşeme ve sünme davranışı tek bir üstel ifade ile temsil edilmektedir ve çoğu gerçek viskoelastik katının davranışı bu temsile uymamaktadır. Bu tür modellerdeki en büyük kısıt, elde edilen bünye denklemlerinin cebirsel değil diferansiyel olmasıdır. Bunun sonucunda, elastik malzemeye göre daha karmaşık bir bünye denkleminin çözülmesi gereği, sistem denklemlerini daha da karmaşık hale getirecektir.

Fung [21] tarafından önerilen ve yumuşak doku modellemesi konusunda çok bilinen bir standart model olan sanki-doğrusal viskoelastik kuram (*quasi-linear viscoelastic theory*) doğrusal olmayan, zaman ve yükleme geçmişine bağlı yumuşak doku mekanik davranışını modellemek üzere pek çok araştırmacı tarafından başarı ile kullanılmıştır. Bu kurama göre gerilme ile gerinme arasındaki ilişki şu şekilde genel bir formül ile gösterilebilir:

$$\sigma(t) = G(t) * \sigma^e(\epsilon) \quad (5)$$

Burada $\sigma(t)$ gerilimin zamana bağlı değişimini, $G(t)$ indirgenmiş gevşeme fonksiyonunu ve $\sigma^e(\epsilon)$ anlık elastik gerilim tepkisi fonksiyonunu ifade eder. Farklı $G(t)$ ve $\sigma^e(\epsilon)$ fonksiyonları kullanılarak farklı modellerin elde edilebilmesiyle birlikte literatürde en fazla kullanılanları şu şekildedir;

$$G(t) = \frac{1 + C[E_1(t/\tau_2) - E_1(t/\tau_1)]}{1 + C \ln(\tau_2/\tau_1)} \quad (6)$$

$$\sigma^e(\epsilon) = A(e^{B\epsilon} - 1) \quad (7)$$

Buradaki indirgenmiş gevşeme fonksiyonu içerisinde üç parametre bulunmaktadır. Bunlardan τ_1 ile τ_2 zaman sabitleri sırasıyla kısa ve uzun dönem gevşeme davranışlarını kontrol ederken, C parametresi de gevşemenin genliğini belirlemektedir. İfade içerisindeki E_1 birinci üstel integral fonksiyonudur ve şu şekilde tanımlanır:

$$E_1(y) = \int_y^\infty \frac{e^{-z}}{z} dz \quad (8)$$

burada y birinci üstel integral fonksiyonun bağımsız değişkeni, z ise integrali alınan taklit değişkendir.

Anlık elastik gerilme tepkisi fonksiyonunu içerisindeki iki parametre (A , B) ile birlikte toplam beş parametrelilik bir model oluşmaktadır.

Bischoff [30] tarafından önerilen denklemler kullanılarak elde edilen model ise şu şekildedir;

$$\sigma(t) = \int_{\tau=0}^t G(t-\tau) \frac{\partial \sigma^e(\epsilon)}{\partial \epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (9)$$

EVRIK SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

In-vivo deneylerle elde edilen yer değiştirmekuvvet-zaman ilişkileri malzeme kanununun belirlenmesi için gerinme-gerilme-zaman verisine kolaylıkla çevrilemez. Bu amaçla evrik sonlu elemanlar analizi kullanılmaktadır.

Evrik sonlu elemanlar analizinde, deney yapılan bölge ve yakın çevresinin sonlu elemanlar modeli

hazırlanır. Gerekli sınır koşulları, deney sırasında uygulanan yükler, dokunun uyması beklenen bünye denklemi modele girilir. Ancak bünye denklemi ile ilgili katsayılar bilinmediği için başlangıç değerleri rasgele seçilir. Rasgele seçilen bu değerlerle sonlu elemanlar andırımı çalıştırılır, malzeme sabitleri rasgele seçilmiş dokunun tepkisi elde edilir. Üzerinde deney yapılmış gerçek dokunun malzeme sabitleri, rasgele seçilen malzeme sabitlerinden farklı olacağı için, bilgisayar benzetiminden elde edilen tepki de gerçek dokudan elde edilenden farklı olacaktır. Aradaki farkı kapatmak üzere bilgisayar benzetimindeki malzeme sabitleri değiştirilerek andırım yeniden çalıştırılır. Andırımdan elde edilen tepki, gerçek dokudan deneysel olarak elde edilen tepkiye istenen ölçüde yaklaştığında, andırımda kullanılan malzeme sabitlerinin de gerçek yumuşak dokunun malzeme sabitlerine istenen ölçüde yaklaştığı varsayılır ve böylece yumuşak doku mekanik malzeme sabitleri istenen hassasiyetle kestirilebilir [25].

Evrik sonlu elemanlar yönteminin kullanımı sırasında yumuşak dokunun uyması beklenen bünye denkleminin önceden bilindiği varsayılır. Eğer kullanılacak bünye denklemi deney yapılan dokunun mekanik davranışını modellemede yetersiz kalırsa evrik sonlu elemanlar yönteminden bünye denkleminin değiştirilmesine yönelik bir bilgi edinilemez.

İNDENTÖR DENEYLERİNDEN MALZEME KATSAYILARININ BELİRLENMESİ

Bu çalışmada evrik sonlu elemanlar yöntemi ile sabitleri bulunan bünye denklemleri, viskoelastik malzeme modeli temel alınarak geliştirilmiştir. Buna göre (9) numaralı denklem geliştirilerek gerilmenin gerinme ve zamana bağlı tepkisini veren anizotropik denklemler oluşturulmuştur. Bu denklemler şu şekildedir:

$$T_{11}(\varepsilon, t) = \frac{a^2 \varepsilon_1^2}{8\Lambda} \sigma(t) \quad (10)$$

$$T_{22}(\varepsilon, t) = \frac{b^2 \varepsilon_2^2}{8\Lambda} \sigma(t) \quad (11)$$

$$T_{33}(\varepsilon, t) = \frac{c^2 \varepsilon_3^2}{8\Lambda} \sigma(t) \quad (12)$$

Bu denklemlerde T_{11} , T_{22} ve T_{33} üç asal eksenindeki gerilmeler; ε_1 , ε_2 ve ε_3 üç asal eksenindeki gerinmeler; a , b ve c anizotropiye izin veren birim hücre ölçüleridir ancak bu çalışmada anizotropi modellenmemiştir. $\sigma(t)$ ifadesi (9) numaralı

denklem ile hesaplanan baz durumdaki sanki-doğrusal viskoelastik gerilimdir. Λ aşağıdaki biçimde ifade edilir:

$$\Lambda = \frac{a^2 + b^2 + c^2}{8} \quad (13)$$

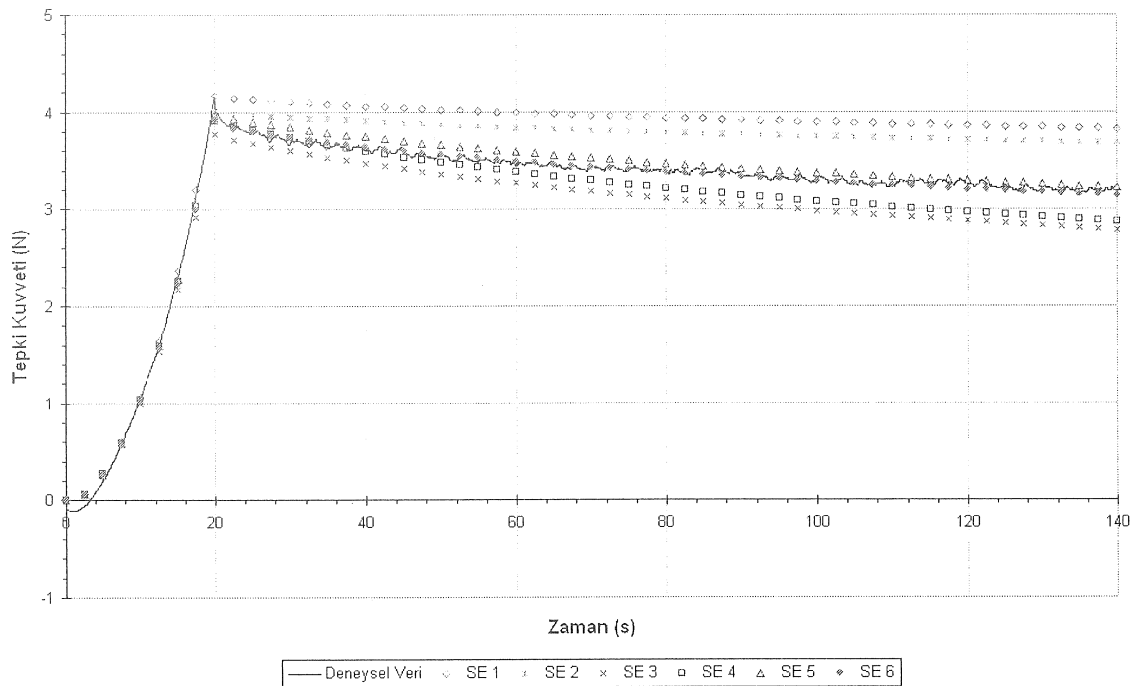
Yukarıda verilen bünye denklemleri kullanılarak yumuşak dokuların karakteristik özellikleri modellenmeye, yani deneysel veriler andırılmaya çalışılmıştır. Sonlu elemanlar benzetimi sırasında model Patran 2005 ile oluşturulmuş ve gerekli sınır koşulları ile diğer tanımlamalar Marc/Mentat 2005r2 ile yapılmıştır. Modelin Marc/Mentat ile çalıştırılması sırasında ise kullanıcı tarafından hazırlanan malzeme modeli Digital Fortran 6.0 ile derlenerek kullanılmıştır. Her denemede malzeme modelinin kodu içerisindeki katsayı değerleri değiştirilmiştir.

Andırım çalışmaları gevşeme davranışı ile başlamıştır. Gevşeme davranışına ait deneysel veri (Şekil 7) eliptik indentör ucunun dokuya 1 mm/s sabit hızla 20 mm basılıp oluşan deplasmanın 120 saniye boyunca sabit tutulmasıyla elde edilmiştir. Aynı yöntem, oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile de gerçekleştirilmiş ve altı sonlu elemanlar denemesi sonucunda deneysel veri yeterli doğrulukla andırılmıştır. Her deneme için zamana karşı oluşan tepki kuvveti eğrileri Şekil 7'de [29] görülmektedir. Ayrıca her sonlu elemanlar çözümünde kullanılan malzeme sabitleri Tablo 1'de [29] verilmiştir.

İlk denemede (SE1) gevşeme sürecinin başında ($t = 20$ s) elde edilen tepki kuvveti değerini doğru olarak kestirebilmek için ikinci denemede (SE2) kısa dönem gevşeme katsayısı (τ_1) küçültülmüş ve gevşemenin başında oluşan tepki kuvveti andırılmıştır.

Üçüncü adımda (SE3), gevşeme genlik sabiti (C) büyütülerek toplam gevşeme miktarı artırılmıştır. Şekil 7'de görüldüğü gibi bu değişiklikten sonra hem kısa dönem hem de uzun dönem gevşeme miktarlarında artış olmuştur. Fakat, uzun dönem gevşeme miktarındaki artışın kısa dönemden daha fazla olması, toplam gevşeme genliğinin artmasını sağlamıştır. Dördüncü denemede (SE4), kısa dönem gevşeme katsayısı bir miktar büyütülerek eğrinin solu sağından biraz daha fazla yukarıya kaldırılmış ve gevşemenin başlangıcındaki tepki kuvveti yeniden yakalanmıştır.

Daha sonra uzun dönem gevşeme miktarını azaltmak, yani eğrinin sağ tarafını yukarıya kaldırmak için beşinci denemede (SE5) uzun dönem gevşeme katsayısı (τ_2) büyütülmüştür. Son olarak altıncı denemede (SE6) kısa dönem gevşeme katsayısı yeniden küçültülerek deneysel veri yeterli doğrulukla andırılabilmiştir ve % 0.74'lük hata kareleri toplamı (NSSE) elde edilmiştir [29].



Şekil 7. Gevşeme Davranışının Modellenmesi

Normalize hata kareleri toplamı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$NSSE = \sum_i \left(\frac{F_{deneysel_i} - F_{model_i}}{F_{deney_{maks}}} \right)^2 \quad (14)$$

Bu denemeler sırasında, daha önce elastik davranışı modellemek için belirlenen A ve B sabitlerini değiştirmeye gerek olmamıştır.

Gevşeme davranışı başarılı bir şekilde modellenenildikten sonra, aynı bünye denklemi ve malzeme katsayıları kullanılarak sünme davranışının andırımı yapılmıştır. Sünme davranışına ait deneysel veri (Şekil 8) eliptik indentör ucunun dokuya 1 mm/s sabit hızla 20 saniyede 20 mm basılıp, basma sonunda oluşan tepki kuvvetinin 120 saniye boyunca sabit tutulmasıyla elde edilmiştir. Aynı yöntem, oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile de gerçekleştirilmiş ve üç sonlu elemanlar denemesi sonucunda deneysel veri yeterli doğrulukla andırılmıştır. Her deneme için zamana karşı oluşan yer değiştirme eğrileri Şekil 8'de [29] görülmektedir. Ayrıca her sonlu elemanlar çözümünde kullanılan malzeme sabitleri Tablo 2'de [29] verilmiştir.

İlk denemede (SE1), gevşeme davranışını andıran son katsayı seti kullanılmıştır. Bu denemede Şekil 8'de de görüldüğü gibi yeterli miktarda sünme tepkisi elde edilememiştir. Dolayısıyla ikinci ve

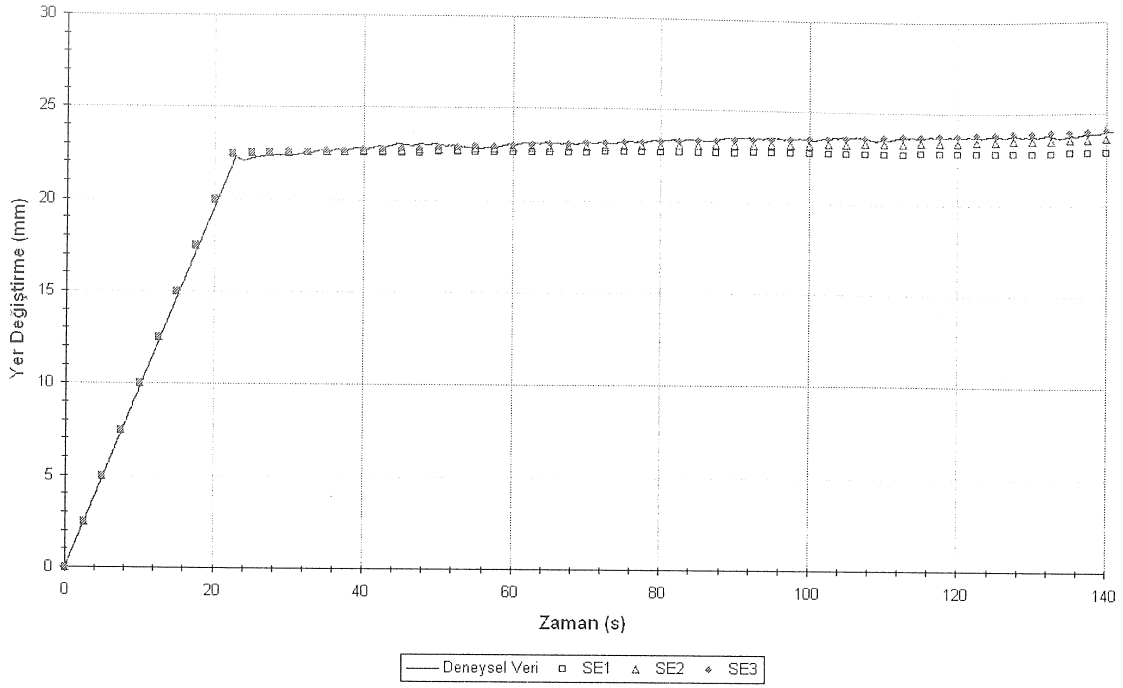
üçüncü denemelerde elastik malzeme katsayısı (A) azaltılarak deneydeki gibi sünme elde edilmeye çalışılmıştır. Son denemenin (SE3) ardından % 0.31 hata kareleri toplamı değeri ile bu andırım da başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1- Gevşeme Davranışının Andırımında Kullanılan Malzeme Sabitleri

	A	B	C	τ_1	τ_2	a	b	c
SE1	7.6E-37	42	0.08	8.0	1400	0.7	0.8	0.9
SE2	7.6E-37	42	0.08	4.0	1400	0.7	0.8	0.9
SE3	7.6E-37	42	8.0	4.0	1400	0.7	0.8	0.9
SE4	7.6E-37	42	8.0	5.0	1400	0.7	0.8	0.9
SE5	7.6E-37	42	8.0	5.0	14000	0.7	0.8	0.9
SE6	7.6E-37	42	8.0	4.0	14000	0.7	0.8	0.9

Tablo 2- Sünme Davranışının Benzetiminde Kullanılan Malzeme Sabitleri

	A	B	C	τ_1	τ_2	a	b	c
SE1	7.6E-37	42	8.0	4.0	14000	0.7	0.8	0.9
SE2	3.4E-37	42	8.0	4.0	14000	0.7	0.8	0.9
SE3	2.6E-37	42	8.0	4.0	14000	0.7	0.8	0.9



Şekil 8. Sünme Davranışının Modellenmesi

SONUÇ

Önerilen bu yeni malzeme modeli sayesinde gevşeme ve sünme davranışlarının her ikisi de tek bir bünye denklem kullanılarak ve sadece bir sabitin değeri değiştirilerek andırılabilmiştir. Bu değişim, malzeme modelinin her iki davranışı modellemede yetersiz kalması nedeniyle olabileceği gibi deneysel hatalar ve canlı yumuşak doku üzerinde deney yapılırken dokunun özelliklerindeki değişimler ve adaptasyon nedeniyle de olabilir. Gevşemenin modellenmesi % 0.74 ve sünmenin modellenmesi % 0.31 gibi çok küçük hata payları ile gerçekleştirilebilmiştir. Aynı şekilde yine bu malzeme modeli kullanılarak histeris ve alışma davranışlarının modellenebileceği düşünülmektedir.

Yumuşak doku modellemesi ile ilgili literatür incelendiğinde, yazarların bilgisi dahilinde, sünme ve gevşeme davranışların her ikisini tek bir bünye denklemi ve çok az katsayı değişikliği ile andırabilen modele rastlamak mümkün değildir. Bugüne kadar bazı bilim adamları sadece gevşeme davranışını modelleyebilmiş, bazıları da gevşeme andırımının sonuçlarından faydalanarak sünmeyi modelleyebilmiştir. Yumuşak doku mekanik davranışları matematiksel serilere uydurulmaya ve model içerisindeki sabitler azaltılmaya çalışılmıştır. Bu çalışma, tüm yumuşak doku davranışlarını tek bir

model ve çok az sayıda sabit değişimi ile andırabilmesi bakımından önemlidir.

Bu model kullanılarak; amputasyon güdüğü ile protez soketi arasında etkileşim modellenerek protez soketi tasarımında iyileştirme sağlanabilir; ayakkabı ile ayak arasındaki etkileşim modellenerek özellikle yaraları geç iyileşen diyabetli hastalar için ayakkabı tasarımında iyileştirme sağlanabilir; yatan hasta ile yatak arasındaki etkileşim modellenerek özellikle felçli hastalarda oluşan yatak yaralarını en az seviyeye indirmek için yatak tasarımına yenilikler getirilebilir.

Gelişen teknolojinin de yardımıyla, çok daha ayrıntılı sonlu elemanlar modelleri oluşturularak, ve çok daha hassas deneyler sonucu daha doğru veriler elde edilerek, yumuşak doku davranışları daha da küçük hatalarla hassas olarak yapılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan deney birimi ilk olarak TÜBİTAK MİSAG-183 kapsamında üretilmiş, Yüksek Lisans öğrencisi Ali Tolga Petekkaya tarafından geliştirilmiştir. Yazarlar, indentör için eliptik uçları özenle üreten Birant Makina'dan Makina Mühendisi Sayın Emir Birant'a ve yumuşak doku deneylerini yapan ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü yüksek lisans öğrencisi Ali Tolga Petekkaya'ya teşekkür eder.

QUASI-LINEAR VISCOELASTIC MATERIAL MODELS TO MODEL THE MECHANICAL BEHAVIOR OF SOFT BIOLOGICAL TISSUES OBTAINED VIA IN VIVO INDENTOR EXPERIMENTS

The purpose of this study is to simulate the mechanical behavior of soft biological tissues by using quasi-linear viscoelastic model with the minimum possible change in the coefficients. Different sections of human body exhibit different responses like stress relaxation, creep, hysteresis and preconditioning to external loading conditions. These body sections are generally assumed as pseudoelastic or viscoelastic. After pre-selection of the material model from one of the constitutive equations available in literature for the current study, the finite element model and the material model to be used with this model have been created. Then, the constants in the code which simulates the in vivo experimental data that was obtained by indenting the elliptic indenter tip into the forearm, medial part as close as possible, have been derived by inverse finite element method. Consequently, the characteristic behaviors of the soft tissue could be simulated. Despite the big size of the finite element model and very long submission times, relaxation and creep behaviors could be simulated with the maximum normalized sum of square errors of 0.74 % and 0.31 %, respectively. These values prove that this material model is well suited for the simulation of the behavior of soft biological tissues. By using different experimental data obtained from other sections of human body, simulation of the behavior of different soft tissues can be achieved by using this material model.

Keywords: Soft Tissue, Viscoelastic, Inverse Finite Elements.

KAYNAKÇA

- [1] Fung, Y. C., Perrone, N., Anliker, M., *Stress-Strain History Relations of Soft Tissues in Simple Elongation*, Biomechanics: Its Foundations and Objectives, chapter 7, pp. 181-208, Prentice-Hall, 1970.
- [2] Bischoff, J. E., Arruda, E. M., Grosh, K., *Finite Element Modeling of Human Skin Using an Isotropic, Nonlinear Elastic Constitutive Model*, Journal of Biomechanics, vol. 33, pp. 645-652, 2000.
- [3] Commean, P. K., Smith, K. E., Vannier, M. W., Szabo, B. A., Actis, R. L., *Finite Element Modeling and Experimental Verification of Lower Extremity Shape Change Under Load*, J. Biomechanics, vol. 30, pp. 531-536, 1997.
- [4] Deng, B., Hubbard, R., *Measuring and Modeling Force-Deflection Responses of Human Thighs in Seated Posture*, Advances in Biomechanics, vol. 28, pp. 101-102, 1994.
- [5] Fung, Y. C., Fronek, K. and Paticucci, P., *On Pseudo-elasticity of Arteries and the Choice of its Mathematical Expression*, Amer. J. of Physiology, vol. 237, pp. 620-631, 1979.
- [6] Grashow, J. S., Sacks, M. S., Liao, J., Yoganathan, A. P., *Planar Biaxial Creep and Stress Relaxation of the Mitral Valve Anterior Leaflet*, Annals of Biomedical Engineering, vol. 34, pp. 1509-1518, 2006.
- [7] Hoppin, F. G., Lee, G. C. and Dawson, S. V., *Properties of Lung Parenchyma in Distortion*, J. Applied Physiology, vol. 39, pp. 742-751, 1975.
- [8] Ledoux, W. R., Blevins, J. J., *The Compressive Material Properties of the Plantar Soft Tissue*, Journal of Biomechanics, vol. 40, pp. 2975-2981, 2007.
- [9] Mow, V. C., *Biphasic Creep and Stress Relaxation of Articular Cartilage in Compression*, Journal of Biomechanical Engineering, vol. 10, pp.73-84, 1980.
- [10] Oza, A., Vanderby Jr., R., Lakes, R. S., *Generalized Solution for Predicting Relaxation from Creep in Soft Tissue: Application to Ligament*, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 48, pp. 662-673, 2006.
- [11] Provenzano, P. P., Lakes, R. S., Corr, D. T., Vanderby, R., *Application of Nonlinear Viscoelastic Models to Describe Ligament Behavior*, Biomechan Model Mechanobiol, vol. 1, pp. 45-57, 2002.
- [12] Samani, A., Plewes, D., *A Method to Measure the Hyperelastic Parameters of ex vivo Breast Tissue Samples*, Physics in Medicine and Biology, vol. 49, pp. 4395-4405, 2004.
- [13] Samani, A., Plewes, D., *An Inverse Problem Solution for Measuring the Elastic Modulus of Intact ex vivo Breast Tissue Tumours*, Physics in Medicine and Biology, vol. 52, pp. 1247-1260, 2007.
- [14] Schwartz, J. M., Denninger, M., Rancourt, D., Moisan, C., Laurendeau, D., *Modeling Liver Tissue Properties Using a NonLinear Viscoelastic Model for Surgery Simulation*, Medical Image Analysis, vol. 9, pp. 103-112, 2005.
- [15] Toms, S. R., Dakin, G. J., Lemons, J. E., Eberhardt, A. W., *Quasi-Linear Viscoelastic Behavior of the Human Periodontal Ligament*, Journal of Biomechanics, vol. 35, pp. 1411-1415, 2002.
- [16] Tong, P. and Fung, Y. C., *The Stress-Strain Relationship for the Skin*, J. Biomechanics, vol. 9, pp. 649-657, 1976.

- [17] Vaishnav, R. N., Young, J. T., Janicki, J. S. and Patel, D. J., *Nonlinear Anisotropic Elastic Properties of the Canine Aorta*, Biophysical J., vol. 12, pp. 1008-1027, 1972.
- [18] Fung, Y. C., *On Pseudo-elasticity of Living Tissues*, Mechanics Today J., vol. 5, pp. 487-504, 1980.
- [19] Petekkaya, A. T., Tönük, E. T., *İndentör Deneyleri ile Yumuşak Biyolojik Dokuların Anizotropik Mekanik Davranışının Yerinde Belirlenmesi*, Biyomut 2008, 13. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, Ankara, 29-31 Mayıs 2008.
- [20] Abramowitch, S. D., Woo, S. L.-Y., *An Improved Method to Analyze the Stress Relaxation of Ligaments Following a Finite Ramp Time Based on the Quasi-Linear Viscoelastic Theory*, J. Biomechanical Engineering, vol. 126, pp. 92-97, 2004.
- [21] Fung, Y. C., *Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues*, Springer-Verlag, Second Edition, pp. 23-65, 1993.
- [22] Tönük, E., *Evrık Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Malzeme Özelliklerinin Kestirilmesi ve Biyomekanik Uygulamaları*, MSC.Software Kullanıcılar Konferansı, sf. 25-32, İstanbul, 3-4 Haziran 2004.
- [23] Üsü, K., Tönük, E., *Yumuşak Doku Bünye Denklemleri I: Sanki-Doğrusal Viskoelastik Model*, 13. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, Ankara, 29-31 Mayıs 2008.
- [24] Üsü, K., Tönük, E., *Yumuşak Doku Bünye Denklemleri II: Geliştirilmiş Sanki-Doğrusal Viskoelastik Model*, 13. Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Toplantısı, Ankara, 29-31 Mayıs 2008.
- [25] Petekkaya, A. T., Üsü K., Tönük, E., *Yumuşak Doku Mekanik Modelleri*, Ortopedi Biyomekaniği Kitabı, baskıda.
- [26] Fung, Y. C., *Biorheology of Soft Tissues*, *Biorheology* J., vol. 10, pp. 139-155, 1973.
- [27] Fung, Y. C., *Elasticity of Soft Tissues in Simple Elongation*, *Am. J. Physiology*, vol. 213, pp. 1532-1544, 1967.
- [28] Tönük, E., Silver-Thorn, M. B., *Nonlinear Elastic Material Property Estimation of Lower Extremity Residual Limb Tissues*, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 11, pp. 43-53, 2003.
- [29] Üsü, K., *Identification Of Soft Tissue Mechanical Material Model And Corresponding Parameters From In Vivo Experimental Data By Using Inverse Finite Element Method*, M.S. Thesis, Middle East Technical University, 2008.
- [30] Bischoff, J. E., *Static Indentation of Anisotropic Biomaterials Using Axially Asymmetric Indenters - a Computational Study*, *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 126, pp. 498-505, 2004.

Mustafa Yurdakul

Doç.Dr.

Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi
Üniversitesi, Ankara

Kadir Gökhan Güçlü

Mak. Yük. Müh.

Halkbank Genel Müdürlüğü,
Söğütözü, Ankara

Yusuf Tansel İç

Dr.

T.C. Ziraat Bankası A.Ş., Altındağ,
Ankara

Bir Traktör Fabrikasında Hücresel İmalat Uygulaması

Bu makalede, Ankara da bulunan bir traktör fabrikasında hücresel üretim uygulamasının nasıl yapılacağı incelenmiştir. Hücresel imalat uygulamasında, öncelikle üretim akış analiz yöntemi kullanılarak hücreler (makina grupları) elde edilmiştir. Hollier-2 yöntemi ile hücre içi makina yerleşimi yapıldıktan sonra oluşturulan hücreleri de kapsayan fabrika içi yerleşim planlaması yapılmıştır. Çalışmada ayrıca traktör fabrikasında hücresel imalatın makina yerleşiminden bir sonraki aşaması olan montaj hattı ile imalat hücreleri arasındaki parça akışının yeniden düzenlenmesi kanban sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fabrikada hücresel imalat uygulamasıyla toplam malzeme taşıma mesafesi ve maliyetinde %70'in üzerinde kazanç elde edilebileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hücresel imalat, hücresel yerleşim, fabrika yerleşimi, kanban.

1. GİRİŞ

İmalatları açısından benzer özellikler taşıyan parçaların aynı makineler, aparatlar ve ekipmanlarla bir imalat hattı mantığında üretilebilmeleri için oluşturulan imalat sistemleri "hücre" olarak tanımlanmaktadır. Bir hücrede benzer parça ailesini üretmek için çalışanların, makinelerin ve gerekli teçhizatın bir takım olarak bir araya getirilmesi (gruplaşma) ve işletilmesi ise "hücresel imalat" olarak tanımlanmaktadır [1]. Hücresel imalat, her hücrede hangi parçaların üretileceği ve hangi makinelerin yer alacağına ilişkin kararın verilmesi ile başlar. Hücrelerin kendi içlerinde bulunan makinelerin yerleştirilmesi ve oluşturulan hücrelerin fabrika içerisinde konumlandırılması ise ikinci aşamayı oluşturur. Üçüncü aşama ise hücreler ve montaj hatları arasında parça akışını kontrol etmek amaçlı kullanılan kanbanların sayılarını ve özelliklerini belirlemeyi kapsar [2-3]. Kanbanlar sadece parça akışını kontrol etmekle kalmaz aynı zamanda üretim sırasında oluşan anormalliklerin saptanmasında görsel kontrol araçları olarak da kullanılırlar. Örneğin, stok sahasına ulaşmış ve üzerinde kanban olmayan parçalar, gereğinden fazla üretimin bir göstergesi olarak kabul edilir [4].

Hücresel imalat, çeşitlilik gösteren ürünleri mümkün olan en kısa sürede ve en az maliyetle üretmeye çalışan bir yaklaşımdır. Her bir hücre; iş istasyonlarının, makinelerin veya ekipmanların bir ürün veya birbirine benzer parça ailesinin üretilebilmesi için bir araya getirildiği, beklemeleri ve taşımayı minimize eden bir yapıdadır. Hücreler, bir süreci, bir parçayı, tüm bir ürünü veya bir parça gurubunu imal etmek için tasarlanabilir [3].

Hücreler sayesinde tüm üretim kaynakları birbirlerine yakın olmalarının getirdiği kolay

izlenebilme ve iletişim avantajlarından faydalanmaktadır. Hücreler, değişken üretim ihtiyaçlarının en hızlı şekilde karşılanabilmesi için esnek olarak tasarlanırlar [2].

Ankara'da faaliyet gösteren bir traktör fabrikası çok sayıda parçanın üretilerek bir araya getirilmesi işleminde yukarıda belirtilen avantajlardan faydalanmak üzere hücresel imalat sistemini üretim sisteminde uygulamaktadır. Traktör Fabrikasının mevcut yerleşiminde hücresel imalatın yerine fonksiyonel yerleşimin görüldüğü kısımları da hücresel bir yapıya çevirmek, bir başka ifadeyle, traktör fabrikasında hali hazırda uygulanan hücresel imalat uygulamasının kapsamının tüm yerleşim planına yayılmasını sağlamak bu çalışmanın temel amacıdır.

Bu amaçla çalışmada öncelikle traktör fabrikasının mevcut yerleşim planı çizilmiş (Ek-1), fabrikadaki tüm parçalar ve makineler gözden geçirilerek fabrikanın sürekli ürettiği parçalar ile işlendikleri makineler kullanılarak örnek bir hücresel imalat uygulaması yapılmıştır. Makalede ilk olarak hücrelerin oluşturulmasında, parçaların hangi makinelerde işlendiğini gösteren parça-makina matrisini kullanan ROC algoritmasının [5,6] kullanılması açıklanmıştır. ROC algoritması uygulaması sonucu 13 hücrenin oluştuğu sonuç parça-makina matrisi elde edilmiştir. İkinci aşamada, Hollier-2 metodu [5,7] kullanılarak hücrelere atanan makinelerin hücre içerisinde yerleşimi yapılmıştır. Oluşturulan hücrelerin birbirleri ile olan ilişki durumlarına göre yakın olması gerekenler belirlenerek yeni yerleşim planı (Ek-2) elde edilmiştir. Son olarak ise, kanban uygulamasına örnek teşkil etmesi için 10. Hücre ve montaj hattı arasında olan parça akışlarını düzenleyen kanban sisteminin oluşturulması verilmiştir. Uygulamada

kullanılan ROC algoritması, Hollier-2 Metodu ve Den-E tabloları yöntemlerinin kullanım ve uygulanma esaslarına ilişkin detaylı bilgiler için [5-8] numaralı kaynaklara bakılabilir.

2. TRAKTÖR FABRİKASINDA HÜCRELERİN OLUŞTURULMASI VE YENİ YERLEŞİM PLANININ ELDE EDİLMESİ

Çalışmamızda uygulamanın gerçekleştirildiği traktör fabrikasında şanzıman kutusu, transmisyon kutusu, motor bloğu, silindir kafası, diferansiyel kutusu, hidrolik kaldırıcı, redüktör kovanları, cer ve zaman dişlileri, ayna mahrutu dişlileri olarak sıralayabileceğimiz parçaların üretimi gerçekleştirilmektedir. Çalışmada fabrikada üretilen tüm parçalar incelenmiş ve sürekli olarak üretilen 150 adet parça ve bunların işlem gördüğü 128 adet

makina hücresel imalat uygulaması için öncelikle seçilmiştir.

İnceleme sonucu, operasyon planları ile beraber parçaların işlendiği makinaların; temel teknik özellikleri, parçaların genel olarak geometrik şekli ve boyutları, taşıma sistemleri, parçaların ara stok durumları, depolanmaları, herhangi bir makina arıza oluştuğunda parçaların başka hangi alternatif makinalarda üretileceği, parçaların üretim süreleri, makina hazırlık süreleri ve işçilik zamanı gibi bilgilere ulaşılmıştır. Ayrıca hangi parçanın hangi traktör tipinde kaç adet kullanıldığı bilgisi kullanılarak parçaların aylık üretim miktarları elde edilmiştir. Çizelge 1'de "1.48.106" kodlu parçaya ait operasyon bilgileri verilmiştir. Bu parça ayda ortalama 440 adet üretilmektedir. Çizelge 1'e benzer şekilde fabrikada üretilen tüm parçalar için operasyon sayfası özeti hazırlanmıştır.

Çizelge 1. "1.48.106" kodlu parçaya ait operasyon sayfası özeti

PARÇA NO	OPERASYON NO	TEZGAH NO	BÖLÜM NO	OPERASYON TANIMI	STANDART SÜRE (Dakika)	İŞÇİLİK SÜRESİ (Dakika)	HAZIRLIK SÜRESİ (Dakika)
1.48.106	20	080-001	IB04	ISLAH ET	7,06	3,17	-
1.48.106	40	089-003	IB04	KUMLA	0,60	0,27	-
1.48.106	50	007-007	B01	PARÇANIN BİR TARAFINI VE DELİĞİNİ İŞLE	4,72	2,36	30
1.48.106	60	007-008	B01	PARÇANIN DİĞER TARAFINI VE DELİĞİ İŞLE	5,13	2,76	30
1.48.106	70	020-003	C01	M=2,58, Z=26 FORMUNDA BROŞ ÇEK	3,00	3,00	45
1.48.106	80	042-004	B01	M=5,5, Z=68 FORMUNDA DİŞLİ AÇ	15,00	7,50	60
1.48.106	90	047-001	B01	M=5,5, Z=68 FORMUNDAKİ DİŞLİYİ RASPALA	6,32	3,16	45
1.48.106	100	067-012	B03	YIKA VE HAVA TUT	1,00	2,00	-
1.48.106	110	083-005	IB04	KARBÜRLE	31,92	7,17	-
1.48.106	120	086-013	IB04	TEMPERLE	4,50	4,11	-
1.48.106	140	089-004	IB04	KUMLA	2,14	1,11	-

Parçalara ait operasyon sayfalarından yararlanılarak başlangıç parça-makina matrisi oluşturulmuştur. Başlangıç parça-makina matrisinde parçalar satırlara, makinalar ise sütunlara yerleştirilmiş ve her parçanın işlem gördüğü makinalara ilişkin kısım "1" ile kodlanmıştır. Parçaların işlem görmedikleri makinalara ilişkin değerler ise "0" ile kodlanmıştır. Oluşturulan parça-makina matrisinin boyutları 150×128 (150 parça, 128 makina) dir. Ancak az sayıda bulunan ve çok sayıda parça tarafından kullanılan makinalar matristen çıkarılarak daha kolay ayrışır bir matris elde edilmiştir. Ayrıca ısıl işlem, broş, yıkama, testere ve el işçiliği gibi hücre içinde yer almasına gerek olmayan operasyonlar matris kapsamına alınmamışlardır. Böylece oluşan başlangıç parça-makina matrisinin yeni boyutları 150 × 110 olmuştur (Çizelge 2). Matriste kullanılan makinalar kodları ile birlikte gruplanarak Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 3 de aynı satırda verilen makinalar, parçaların imalat sürecinde birbirlerinin yerine kullanılabilir alternatifleri olan makinlardır. Çizelge 3'te aynı satırda birinci rakam makinanın tipini ve devamındaki

sayılar ise makina numaralarını vermektedir. Örneğin 17. sıradaki CNC İşleme Merkezine ait makinalar incelendiğinde, 7 adet makina bulunmaktadır (makina numaraları: 6, 26, 38, 39, 40, 50, 70). Bu makinaların marka, model, üretim yılı, devir sayısı özellikleri aynıdır ve birbirlerinin alternatifleridir.

2.1. ROC Algoritması Kullanarak Hücrelerin Elde Edilmesi Süreci

Hücrelerin elde edilmesi için parça-makina matrisine Microsoft Excel'de ROC algoritmasını uygulayan makrolar hazırlanmıştır. ROC algoritması matriste herhangi bir değişiklik olmayana kadar uygulanmıştır. Elde edilen sonuç matrisi incelendiğinde parça ailelerinin belirlendiği ve bu parçaları işleyecek 13 imalat hücrenin olduğu görülmüştür [9]. Sonraki aşamada, oluşan 13 hücrede parçaların gerektirdiği işlem sırasına göre hücre içi yerleşiminin yapılması gerekmektedir. Ayrıca bu parçaları üreten makinaların kullanım sürelerine göre her makina tipinden kaç adet yerleştirileceği belirlenmelidir.

Çizelge 2. Başlangıç parça-makina matrisi

Sıra No	Parça No	Resim No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	..	109	110
			11-(6,7,9,10,19,20,23,25	12-6	18-1	26-(1,2,4	30-(13,14	32-(3,4	36-(1,5,6,8	47-(1,2	6-(1,3,5,7,9,10,11	70-(4,7,11,18,20,22,23,26,27,30,31,38,39	73-(7,8,9,12,16,17,23,24,26,28,29	75-(5,6,7,13,15	99-1	10-(1,2,3,5,6,7	11-(6,7,9,10,19,20,23,25		18-1	10-(19,20,22
1	1.10.052	5085945	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.21.008	5157941	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1.21.008	5089413	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	1.21.009	5149253	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1.21.009	599824	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1.21.009	5088887	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1.21.015	5195411	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1.26.213	4993814	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1.26.213	5124803	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1.26.214	5089355	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
149	1.32.608	5088893	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1.65.315	5085930	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Çizelge 3. Makinalar ve kodlarının anlamları

Sıra	Makina Grupları	Makinaların Adı
1	8-32	ÖZEL SIVAMA TEZGAHI
2	13-1	DUBLEX İKİ MİLLİ FREZE TEZGAHI
3	18-1	CNC DİKEY İŞLEME MERKEZİ
4	25-1	KAMA KANALI AÇMA TEZGAHI
5	12-2	DİKEY FREZE TEZGAHI
6	20-(1,2)	YATAY BROŞ TEZGAHI
7	12-3	İKİ KAFALI FREZE TEZGAHI
8	20-3	DİK BROŞ TEZGAHI
9	12-4	DİK FREZE TEZGAHI
10	6-6	PROGRAM KONTROLLU AĞIR TORNA TEZGAHI
11	12-6	DÖNER TABLALI ÖZEL FREZE TEZGAHI
12	26-6	PUNTA DELİK VE ALIN TEMİZLEME TEZGAHI
13	10-(1,2,3,5,6,7,8,9,10,15,17)	CNC YATAY TORNA TEZGAHI
14	10-(19,20,22)	CNC İKİ KAFALI TORNA TEZGAHI
15	11-(7,9,10,19,20,23,25)	YATAY FREZE TEZGAHI
16	17-(1,2,3,4)	CNC İŞLEME MERKEZİ
17	17-(6,26,38,39,40,50,70)	CNC İŞLEME MERKEZİ
18	26-(1,2,4)	PUNTA VE ALIN TORNA TEZGAHI
19	30-(13,14)	DIŞ ÇAP TAŞLAMA TEZGAHI
20	30-(16,17,24,27)	CNC DIŞ ÇAP TAŞLAMA TEZGAHI
21	32-(3,4)	PUNTASIZ TAŞLAMA TEZGAHI
22	33-1	ÖZEL TAŞLAMA TEZGAHI
23	34-1	YÜZEY TAŞLAMA TEZGAHI
24	34-2	YÜZEY TAŞLAMA TEZGAHI
25	34-3	YÜZEY TAŞLAMA TEZGAHI
26	36-(5,6,8)	ZIMPARA TAŞ TEZGAHI
27	40-2	DİŞLİ PAH KIRMA TEZGAHI
28	42-(2,3,4,5,6,7,8,9,10)	AZDIRMA İLE DİŞ AÇMA TEZGAHI
29	45-3	KONİK DİŞ AÇMA TEZGAHI
30	47-(1,2,3,4)	CNC RASPA TEZGAHI
31	5-(4,5)	KOPYA TORNA TEZGAHI
32	6-(1,3,5,7,9,10,11)	PROGRAM KONTROLLU TORNA TEZGAHI
33	7-(7,8)	CNC DİK TORNA TEZGAHI(EMAG)
34	70- (4,7,11,18,20,22,23,26,27,30,31,38,39)	RADYAL MATKAP TEZGAHI
35	x73-(5,18,20)	SÜTUNLU MATKAP TEZGAHI ÇOK MİLLİ
36	73-(7,8,9,12,16,17,23,24,26,28,29)	SÜTUNLU MATKAP TEZGAHI
37	74-2	CNC DERİN DELİK TEZGAHI
38	75-(5,7,15)	HİDROLİK PRES TEZGAHI
39	75-14	CNC HİDROLİK PRES TEZGAHI
40	97-1	ALIN KAYNAK MAKİNESİ
41	99-(1,2)	GAZALTI KAYNAK MAKİNESİ

2. Hücre İçi Yerleşimin Yapılması

Elde edilen 1 nolu hücrenin hücre içi yerleşiminin yapılması örnek olarak aşağıda sunulmuştur. Çizelge 4'de başlangıç parça-makina matrisinden ROC algoritması kullanılarak elde edilen sonuç parça-makina matrisinin 1. hücresine ait kısmı sunulmaktadır.

2.2.1. Birinci hücreye ait makinaların yükleri

Traktör fabrikası ayda ortalama 22 gün çalışmaktadır. Makinaların kullanım sürelerini belirlemek için Çizelge 5 oluşturulmuştur. Bu çizelgede, hücredeki her parçanın işlenmesi sırasında gerekli makinaların kullanım süreleri belirlenmiştir. İşlem zamanları ve makina ayar zamanları ile birlikte aylık toplam çalışma süresi dakika olarak hesaplanmış ve ortalama olarak günlük çalışması gereken süre saat olarak belirtilmiştir. Buna göre makinalarda, parçaların günlük olarak toplam kullanım süresine göre hücre içerisinde makina tipinden kaç adet bulunması gerektiği belirlenmiş ve Çizelge 5'de son satırda sunulmuştur. Hesaplamalarda fabrika da fazla sayıda bulunmayan bazı makinaların iki vardiya gerekirse üç vardiya şeklinde çalışabilmeleri mümkündür.

2.2.2. Birinci hücrenin makina yerleşiminin yapılması

Parça rotalarını göstermek için Çizelge 6 oluşturularak parçaların işlem sıraları ve aylık üretilmesi gereken miktarlar gösterilmiştir. Örneğin parça no: 182533A ve resim no: 5190221 olan ilk parça sırasıyla ilk işlem Hidrolik Pres (75), ikinci işlem Radyal Matkap (70) ve üçüncü işlem Taşlama Tezgahı (30) makinalarında işlem görmektedir ve ayda 900 adet üretilmektedir. Birinci hücreye ait tüm parçaların işlem sıralarını ve aylık üretim adetleri Çizelge 6'da mevcuttur ve sonraki aşama olan "Den-E" tabloları ise Çizelge 6 kullanılarak oluşturulacaktır [5-8].

Çizelge 7'de birinci hücreye ait makinalar arası parça akışlarını gösteren "Den-E" tablosu verilmektedir. "Hollier-2" metoduna göre makinalara ait "Den / E" oranları hesaplanmış ve bu oranlar büyüktür küçüğe doğru sıralanarak makinaların en uygun sıra ile dizilmeleri sağlanmıştır. Sonraki aşamada "Den-E" tablosundaki parça akışlarına göre hücrenin iş akış diyagramı çizilmiştir. Çizelge 8'de ise "Den/E" değerlerine göre sıralama gösterilmiştir. Örneğin; Taşlama (no:30) için en küçük değer "0,03" ve punta tezgahı (no:26) için en büyük değer "∞" dur.

Çizelge 4. Sonuç parça-makina matrisinde 1. Hücreyi oluşturulan kısım

Sıra No	Parça no	Resim no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			75-(5,6,7,13,15	30-(16,17,24,27	70-(4,7,11,18,20,22,23,26,27,30,31,38,39	17-(38,39,40	10-(1,2,3,5,6,7	26-(1,2,4	74-2	11-(6,7,9,10,19,20,23,25	42-(2,4,5,3,6,7,8,9,10	6-(1,3,5,7,9,10,11
1	1.82.533A	5190221	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1.89.650	5146784	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1.29.004	598293	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	1.82.550A	5088959	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0
5	1.82.506A	5089121	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
6	1.82.550B	5089122	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
7	1.82.550	5190215	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0
8	1.80.107	4959916	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
9	54-1004	98414013	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0
10	1.28.104	598174	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0
11	1.33.133	5124329	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
12	1.82.530	5146616	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
13	1.26.530	5087033	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
14	1.26.530	5087034	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
15	1.26.530	5089370	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
16	1.82.812	5125647	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
17	1.82.812	5121221	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
18	1.82.550	5089245	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

Çizelge 5. Birinci hücreye ait makina yüklerinin hesaplanması

PARÇA NO	RESİM NO	75	30	70	17	10	26	74	11	42	6
1.82.533A	5190221	414,0 ^a	1148,4	1542,6							
1.89.650	5146784	895,0 ^b	1167,1								
1.29.004	598293	450,0 ^c			7499,7						
1.82.550A	5088959		540,4	1050,4		1235,0	217,0	966,7			
1.82.506A	5089121		580,0		3000,0	790,0	145,0				
1.82.550B	5089122		580,0		9780,0	435,0	271,0				
1.82.550	5190215		3948,8			8972,0	1580,0	7019,3	2177,6		
1.80.107	4959916		2160,0			3375,0	843,3		900,0	4500,0	
54-1004	98414013		8342,0			8644,0	2840,0		1216,9		
1.28.104	598174		3728,0			1900,8	870,3		900,0		
1.33.133	5124329		500,0			312,5	117,1			555,5	
1.82.530	5146616		1384,0			1255,0	580,0				
1.26.530	5087033		1917,1			2565,0					1219,9
1.26.530	5087034		2174,1			3393,0					1383,4
1.26.530	5089370		471,2			628,0					299,9
1.82.812	5125647				2347,2	657,9					
1.82.812	5121221				4070,6	902,8					
1.82.550	5089245					9096,0	1601,3				
Makina Ayar Süresi (Dakika)		50	850	63	285	935	620	100	245	115	190
Aylık Toplam Süre (Dakika)		1809	29491	2656	26982	45097	9685	8086	5439	5170	3093
Günlük Toplam Süre (Saat)		1,4	22,3	2,0	20,4	34,2	7,3	6,1	4,1	3,9	2,3
Gereken Makina Sayısı		1	2	1	2	2	1	1	1	1	1

^a1.82.533A parçası için, 414 dk (işlem zamanı 0,46 dakika x aylık 900 adet), ^b 1.89.650 parçası için, 895 dk (işlem zamanı 1,0 dakika x aylık 895 adet), ^c1.29.004 parçası için, 450 dk (işlem zamanı 0,50 dakika x aylık 900 adet)

Çizelge 6. Birinci hücreye ait parçaların rota bilgisi

Aylık Adet (Parça)	PARÇA NO	RESİM NO	75	30	70	17	10	26	74	11	42	6
900	1.82.533 A	5190221	1	3	2							
895	1.89.650	5146784	1	2								
900	1.29.004	598293	2			1						
290	1.82.550 A	5088959		5	4		2	1	3			
290	1.82.506 A	5089121		3		4	2	1				
290	1.82.550 B	5089122		4		3	2	1				
2106	1.82.550	5190215		5			2	1	4	3		
900	1.80.107	4959916		5			2	1		4	3	
1420	54-1004	98414013		6			2,4,5	1		3		
900	1.28.104	598174		4			2	1		3		
125	1.33.133	5124329		4			2	1			3	
900	1.82.530	5146616		3			2	1				
895	1.26.530	5087033		4			1,3					2
1015	1.26.530	5087034		4			1,3					2
220	1.26.530	5089370		4			1,3					2
900	1.82.812	5125647				2	1					
1235	1.82.812	5121221				2	1					
2135	1.82.550	5089245					2	1				

Çizelge 7. Birinci hücreye ait "Den-E" tablosu

		E										"DEN" Toplamı	"DEN / E"
MAKİNEL		75	30	70	17	10	26	74	11	42	6		
DEN	75		895	900								1795	1,99
	30				290							290	0,03
	70		1190									1190	1,00
	17	900	290									1190	0,44
	10		4740		2425			290	4426	1025	2130	15036	1,17
	26						9356					9356	∞
	74		2106	290								2396	1,00
	11		1800			1420		2106				5326	1,00
	42		125						900			1025	1,00
	6						2130					2130	1,00
"E" Toplamı		900	1114 6	1190	2715	1290 6	0	2396	5326	1025	2130	39734	

2.2.3. Birinci hücre makina yerleşiminin gösterilmesi

Çizelge 8 de hücre içinde sıralamaları verilen makineler doğrusal hat veya U tipi yerleşim biçiminde dizilirler. Doğrusal hat yerleşimi otomatik taşıma sistemlerinin kullanıldığı veya geriye dönük taşımalarının olmadığı durumlarda kullanılır. U tip yerleşimi ise taşımaların operatörler tarafından yapıldığı ve normal akış yönünün tersine malzeme taşımalarının olduğu durumlarda tercih edilir. U tipi yerleşimde operatörler tüm makinalara daha kolay ve çabuk ulaşabilmektedir [10].

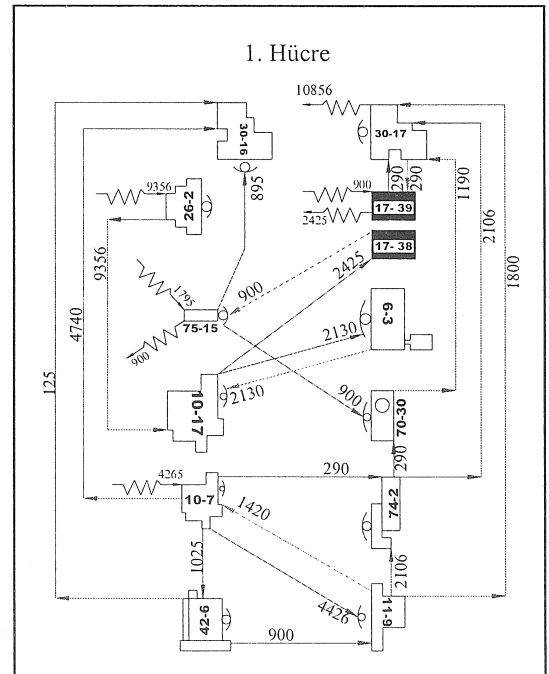
Çizelge 8. Birinci hücreye ait makinelerin "Den/E" oranlarına göre sıralanması

Sıralama	"Den / E" Oranı	Makina Kodları
1	∞	26
2	1,99	75
3	1,17	10
4	1,00	42
5	1,00	11
6	1,00	74-2
7	1,00	70
8	1,00	6
9	0,44	17
10	0,03	30

Birinci hücredeki makina sayısının çokluğu, operatörlerin varlığı ve geri dönüş oranının büyüklüğü nedeniyle U tipi yerleşim tercih edilmiştir (Şekil 1). Şekil 1 incelendiğinde her makina için gelen parça miktarı ile çıkan parça miktarı eşittir.

Ayrıca geri dönüşlü olan taşımalar kesikli çizgilerle ve ilk girişler ile son çıkışlar ise kırık çizgilerle belirtilmiştir. Şekilde işleme merkezleri (17-38, 39) hücre içinde yer almadığından taralı

olarak gösterilmiştir. Geri dönüş oranının hesaplanmasında ise doğal akışın tersine taşınan toplam parça sayısı hesaplanarak hücre içi taşınan toplam parça sayısına bölünmektedir. Freze Tezgahından (11-9) CNC Torna Tezgahına (10-7) 1420 parça, Program Kontrollü Torna Tezgahından (6-3) CNC Torna Tezgahına (10-17) 2130 parça, Taşlama Tezgahından (30-17) İşleme Merkezine (17-38,39) 290 parça ve İşleme Merkezinden Hidrolik Pres'e (75-15) 900 parça geri dönüş yapmaktadır. Toplam geri dönüş yapan parça miktarı 4740 ve toplam transfer miktarı 39 734 parçadır. Oranlandığında; (ters yönde taşınan toplam parça sayısı / toplam taşınan parça sayısı) = "%11,9" değeri hesaplanmıştır.



Şekil 1. Birinci hücre yerleşim planı.

Diğer 13 hücrenin de hücre içi yerleşimleri benzer olarak oluşturulmuştur. Diğer hücrelerde de makina sayılarına ve geri dönüş oranına göre doğrusal hat tipi veya U tipi yerleşim biçimi tercih edilmiştir [9].

2.3. Fabrikanın Yeni Yerleşim Planının Oluşturulması

Hücrelerin belirlenmesi ve hücre içi yerleşimlerin gerçekleştirilmesinin ardından, hücrelerin fabrika içerisinde yerleştirilmeleri gerekmektedir. Çizelge 9'da hücreler arası parça taşımaları gösterilmektedir. Gösterimde parçanın gideceği hücrede; kaç saat çalışması gerektiği, hangi makinada işlem göreceği, kaç adet parçanın işlenmesi gerektiği bilgisi sıra ile verilmiştir. Fabrikada bulunan FMS hattına oluşturulan 1. Hücreden parça taşınması olduğu için Çizelge 9 da FMS 1 olarak gösterilmiştir.

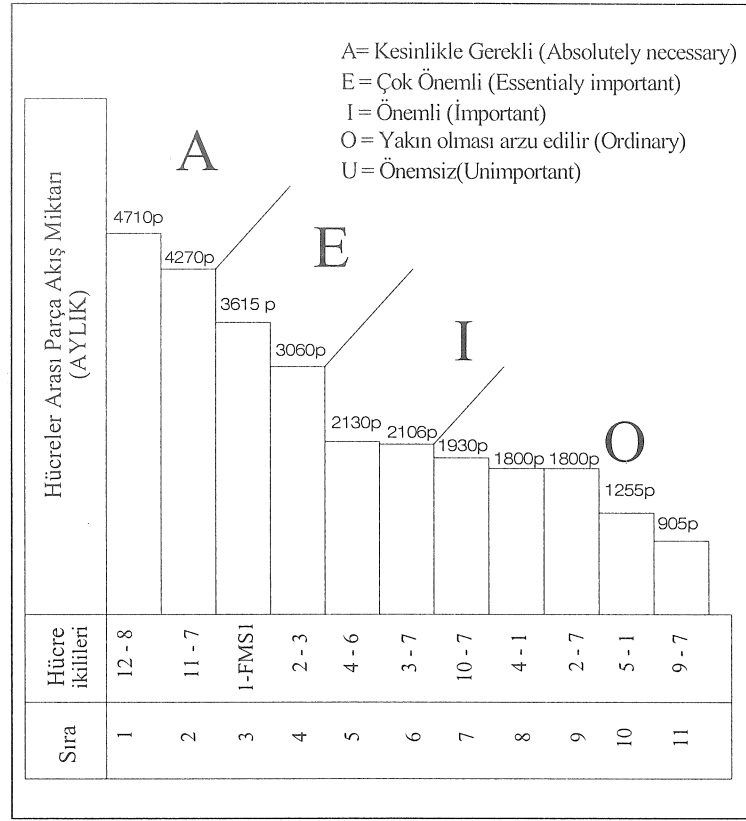
Şekil 2'de çizilen grafikte her hücre ikilisi için, o ikiliyi oluşturan makinaların arasında taşınan

toplam parça sayısına göre yakınlık ilişkisini gösteren "A", "E", "I", "O" harflerinden birisi atanmıştır [11]. Yeni oluşturulan yerleşim planında (Ek 2) aralarında "A" ve "E" ilişkisi olan hücreler yan yana getirilmiştir. Diğer hücreler arası ilişkiler "I" ve "O" ise traktör fabrikasının mevcut yerleşim planının izin verdiği ölçüde dikkate alınmıştır.

Mevcut yerleşim planı (Ek 1) ve yeni oluşturulan yerleşim planı (Ek 2) için makinalar arası mesafeleri gösteren iki matris oluşturularak mevcut ve önerilen yerleşim planları toplam taşıma maliyeti hesaplanarak karşılaştırılmışlardır [9]. Mevcut yerleşim planı için toplam taşıma maliyeti "52.876.452", önerilen hücresel yerleşim planı için "7.026.429" olarak hesaplanmıştır. Rakamlar karşılaştırıldığında taşıma maliyetinde taşıma mesafelerindeki azalmaya paralel olarak önemli bir azalma olduğu görülmektedir [9]. Hesaplama detayları [9] numaralı kaynakta yer almaktadır.

Çizelge 9. Hücreler arası ilişki tablosu

HÜCRELER	H 1	H 2	H 3	H 4	H 5	H 6	H 7	H 8	H 9	H 10	H 11	H 12	H 13	FMS 1
Hücre 1														20,2saat (17-38,39) 3615 p
Hücre 2			2,3saat (26-4) 3060 p				1,2saat (32-4) 900 p							
							1 saat (75-15) 900p							
Hücre 3							1,8 saat (25-1) 2106 p							
Hücre 4	1,3saat (75-15) 1800 p					4,4saat (30-13) 2130 p								
Hücre 5	0,5saat (75-15) 1255 p													
Hücre 6														
Hücre 7														
Hücre 8														
Hücre 9							0,2saat (75-5) 905 p							
Hücre 10							1,5saat (75-5) 1930 p							
Hücre 11							4saat (75-14) 4270 p							
Hücre 12								10,7saat (20-3) 4710 p						
Hücre 13														
FMS 1														



Şekil 2. Hücrelerin önem sırasına göre sıralanması

3. TRAKTÖR FABRİKASINDA KANBAN UYGULAMASI

Traktör fabrikası için önerilen kanban sisteminin oluşturulması Şekil 3 de gösterilen Şanzıman Montaj Hattı ile 10. İmalat Hücresi arasındaki parça transferini düzenleyen çekme kanban sisteminin kurulması örneği ile açıklanmıştır [9]. Ardından aynı örnek içerisinde kanban sayılarının hesaplanması da verilmiştir.

Kanban sisteminin çalışmasında ilk olarak, 10. İmalat Hücresinden Şanzıman Montaj hattına gelen parçaların içinde bulunduğu kutuların her birinin üzerinde; parçanın ne olduğunu, hangi ürün modeline ait olduğunu, kutu kapasitesini ve kutuların hangi hücreden geldiğini belirten bir çekme kanban kartı bulunmaktadır. Parçalar kutulardan alınıp şanzımana monte edildikçe ve her bir kutu boşaldıkça, üzerindeki çekme kanbanları çıkarılıp çekme kanbanı kutusuna yerleştirilir. Ardından, bu kutudaki çekme kanbanları önceden belirlenmiş bir sayıya ulaşıncaya, montaj hattındaki bir işçi boşalmış kutularla birikmiş çekme kanbanlarını alıp, bir forklifle 10. İmalat Hücresinin önündeki ambara gider. 10. İmalat Hücresinde ise ilk iş olarak getirdiği boş kutuları bırakır ve ardından 10. İmalat Hücresine ait olan ambarda hazır beklemekte olan işlenmiş parça kutularına yönelir. Burada elindeki kanban sayısı kadar kutuyu alır ve forklifte yerleştirir. Bu

arada, aldığı her bir parça kutusunun üzerinde yine parçanın ne olduğunu, hangi şanzıman modeline ait olduğunu, hangi işlem sürecinden geçtiğini, kutu kapasitesini belirten bir üretim kanban kartı bulunmaktadır. Kutuları forklifte yerleştirirken üretim kanbanlarını çıkarır ve yerlerine beraberinde getirdiği çekme kanbanlarını yerleştirir. Elindeki çekme kanbanlarının tümü bitene kadar bu işlemi sürdürür. Ardından, ambardaki dolu parça kutuları çekme kanbanları takılı olarak alınıp montaj hattına götürülür.

10. İmalat Hücresinde ise kutulardan çıkarılan üretim kanbanları üretim kanbanı kutusuna yerleştirir. Sonuç olarak çekilen parça kutusu kadar üretim kanbanı kutuya yerleştirilmiş olur. Bu kanbanlar belirli bir parti büyüklüğüne ulaşıncaya toplanır ve kutudaki yerleştirme sırasına göre üretim kontrol panosuna kaydedilir. Üretim panosundaki kayıtların sırasına göre parça üretimi gerçekleştirilir. İşlenen parçalar üretim kanbanları ile beraber parça kutularına yerleştirilir ve ambara konular.

3.1. Kanban Sayısının Hesaplanması

Sistemdeki kanban sayısı sistem içerisindeki stok miktarını belirler. Maksimum stok düzeyi standart kutu başına düşen birim sayısı ile çarpılarak toplam kanban sayısı oluşturulur. Örneğin, her kutuda

50 parça bulunuyorsa ve 3 kutu varsa, toplam stok 3 x 50=150 parça ile sınırlı olur.

Her parçanın üretimi için gerekli toplam kanban kartı sayısı (N) aşağıda verilen Eşitlik 1 ile hesaplanabilir [12]. Formülde, D günlük üretim miktarını, T toplam döngü süresini, S güvenlik katsayısını ve Q bir standart kutunun alabileceği en fazla parça sayısını temsil etmektedir.

$$N = \frac{D \times (T) \times (1 + S)}{Q} \quad (1)$$

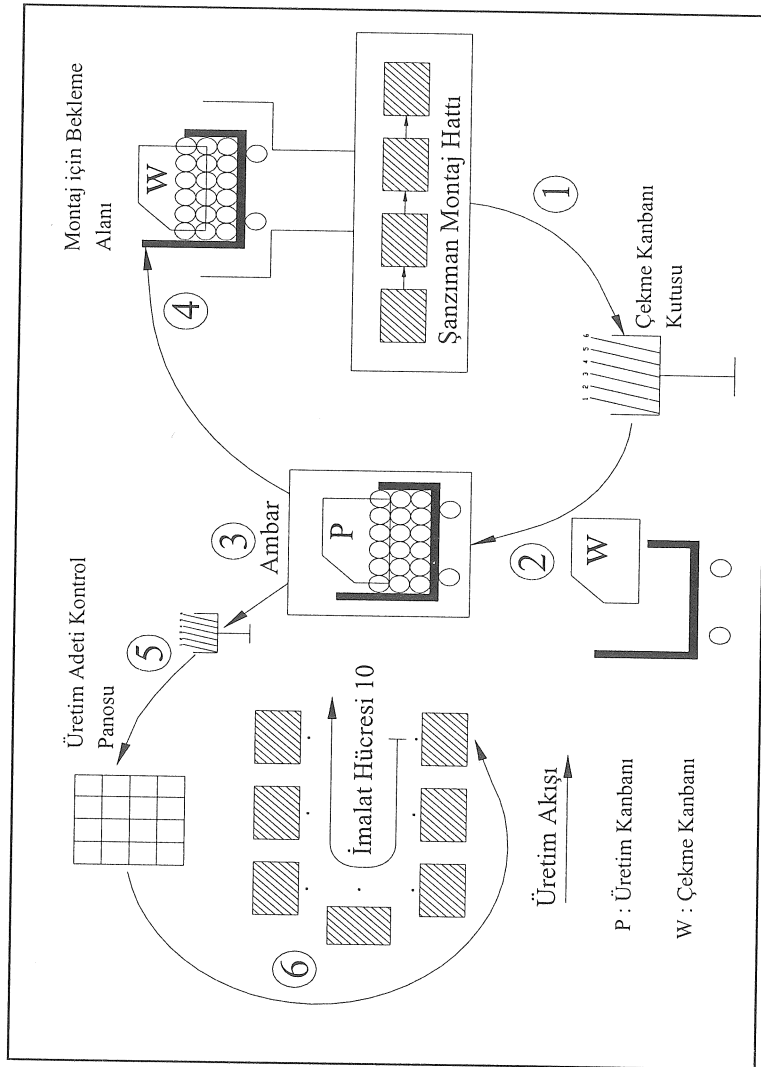
Eşitlik 1 kullanılarak 10. Hücrede üretilen 12 farklı parça tipinin üretilmesi için gerekli olan kanban sayılarının hesaplanması için öncelikli olarak günlük üretim miktarları ve toplam döngü sürelerinin hesaplanması gerekmektedir.

İlk olarak her parçanın ortalama günlük üretim miktarı aylık üretim talebinin aylık iş gününe bölünmesi ile hesaplanmıştır (Çizelge 10). Ayrıca her

parçanın büyüklüğüne göre standart bir kutunun ilgili parçadan en fazla kaç adet alabileceği (Q) belirlenerek Çizelge 10 un son sütununda sunulmuştur.

Ardından döngü sürelerini hesaplamak için gerekli olan parçaların işlem süreleri (Çizelge 11) ve makina ayar süreleri (Çizelge 12) toplanarak hücre içi toplam geçen süre (Çizelge 13) hesaplanmıştır. Parçalar hücreden ayrıldıktan sonra montaj hattına gitmektedir. Montaj hattında parçaların montajı için gerekli süreler (Çizelge 14) hesaplanmıştır. Montaj ve hücre içi toplam geçen sürelerin toplamı kanbanların sayılarını hesaplamada kullanılan döngü sürelerini vermektedir (Çizelge 15). Süre hesaplamalarında parçaların taşınma süreleri ihmal edilmiştir. Ayrıca, bir günlük çalışma süresi 1380 dakika olarak alınmıştır.

Tüm bu hesaplamaların ardından Eş.1 kullanılarak 10. Hücrede üretilen 12 farklı parça için gerekli kanban sayıları aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Kanban hesaplamalarında güvenlik katsayısı olarak 0,05 gün alınmıştır.



Şekil 3. 10. Hücre ile Montaj Hattı Arasındaki Kanban Sistemi

Çizelge 10. Parçaların günlük üretim miktarları

Aylık(22gün) Üretim Adeti	Parça No	Resim No	Ortalama Günlük Üretim Miktarı	Maksimum Parça Sayısı (Kutu Kapasitesi)
1420	54-1411	4770056	65	18
1420	54-1411	5090119	65	18
910	54-1411	98459486	42	10
510	54-1411	98459487	24	6
510	54-1055	4812932	24	6
1420	54-1002	98435129	65	18
1420	54-3509	4769592	65	18
910	54-0805	4772693	42	10
510	54-0805	4809524	24	6
1420	54-0805	5090120	65	18
510	54-1056	4600363	24	6
1420	54-1204	4769412	65	18

Çizelge 11. Parçaların toplam işlem süresi

Parça No	Resim No	Parti Büyüküğü	Parçanın Ortalama İşlem Süresi (dakika)	Parçanın Toplam İşlem Süresi (dakika)
54-1411	4770056	65	1,58	102,70
54-1411	5090119	65	2,1	136,50
54-1411	98459486	42	2,1	88,20
54-1411	98459487	24	2,1	50,40
54-1055	4812932	24	1,25	30,00
54-1002	98435129	65	1,0	65,00
54-3509	4769592	65	0,87	56,55
54-0805	4772693	42	0,94	39,48
54-0805	4809524	24	0,94	22,56
54-0805	5090120	65	0,94	61,10
54-1056	4600363	24	0,66	15,84
54-1204	4769412	65	1,1	71,50
Parçaların toplam işlem süresi				<u>739 dakika</u>

Çizelge12. 10. hücre için makina ayar zamanları

Parça No	Resim No	Makina Ayar Süresi (dakika)
54-1411	4770056	60
54-1411	5090119	60
54-1411	98459486	60
54-1411	98459487	60
54-1055	4812932	120
54-1002	98435129	120
54-3509	4769592	120
54-0805	4772693	60
54-0805	4809524	60
54-0805	5090120	60
54-1056	4600363	60
54-1204	4769412	120
TOPLAM		<u>960 dakika</u>

Çizelge13. Tüm parçalar için hücre içi toplam geçen sürelerin hesaplanması

Parça No	Parça Resim No	Hücre içi toplam geçen süreler
54-1411;	4770056	60 dk ayar süresi + 102,7 dk işlem süresi = 162,7 dk
54-1411;	5090119	60 dk ayar süresi + 136,5 dk işlem süresi = 196,5 dk
54-1411;	98459486	60 dk ayar süresi + 88,20 dk işlem süresi = 148,2 dk
54-1411;	98459487	60 dk ayar süresi + 50,40 dk işlem süresi = 110,4 dk
54-1055;	4812932	120 dk ayar süresi + 30,00 dk işlem süresi = 150,0 dk
54-1002;	98435129	120 dk ayar süresi + 65,00 dk işlem süresi = 185,0 dk
54-3509;	4769592	120 dk ayar süresi + 56,55 dk işlem süresi = 176,5 dk
54-0805;	4772693	60 dk ayar süresi + 39,48 dk işlem süresi = 99,48 dk
54-0805;	4809524	60 dk ayar süresi + 22,56 dk işlem süresi = 82,56 dk
54-0805;	5090120	60 dk ayar süresi + 61,10 dk işlem süresi = 121,1 dk
54-1056;	4600363	60 dk ayar süresi + 15,84 dk işlem süresi = 75,84 dk
54-1204;	4770056	120 dk ayar süresi + 71,50 dk işlem süresi = 191,5 dk
		Toplam İmalat Ön Süresi = 1700 dk
1700 dakika imalat ön süresi		= 1,23 gün hücre içi toplam geçen süre
1380 dakika günlük çalışma süresi		

Çizelge14. Parçaların montaj süreleri

PARÇA NO	RESİM NO	Ortalama Günlük Talep	Ortalama Montaj Süresi (dakika)	Parçalara Ait Toplam Montaj Süresi
54-1411	4770056	65	4,25	276,25 dk (0,20 gün)
54-1411	5090119	65	4,25	276,25 dk (0,20 gün)
54-1411	98459486	42	4,25	178,50 dk (0,13 gün)
54-1411	98459487	24	4,25	102,00 dk (0,07 gün)
54-1055	4812932	24	4,25	102,00 dk (0,07 gün)
54-1002	98435129	65	4,25	276,25 dk (0,20 gün)
54-3509	4769592	65	4,25	276,25 dk (0,20 gün)
54-0805	4772693	42	4,25	178,50 dk (0,13 gün)
54-0805	4809524	24	4,25	102,00 dk (0,07 gün)
54-0805	5090120	65	4,25	276,25 dk (0,20 gün)
54-1056	4600363	24	4,25	102,00 dk (0,07 gün)
54-1204	4769412	65	4,25	276,25 dk (0,20gün)

Çizelge 15. 12 parça için hesaplanan toplam döngü süreleri

54-1411	4770056:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,20 gün montaj süresi = 1,43 gün
54-1411	5090119:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,20 gün montaj süresi = 1,43 gün
54-1411	98459486:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,13 gün montaj süresi = 1,36 gün
54-1411	98459487:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,07 gün montaj süresi = 1,30 gün
54-1055	4812932:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,07 gün montaj süresi = 1,30 gün
54-1002	98435129:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,20 gün montaj süresi = 1,43 gün
54-3509	4769592:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,20 gün montaj süresi = 1,43 gün
54-0805	4772693:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,13 gün montaj süresi = 1,36 gün
54-0805	4809524:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,07 gün montaj süresi = 1,30 gün
54-0805	5090120:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,20 gün montaj süresi = 1,43 gün
54-1056	4600363:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,07 gün montaj süresi = 1,30 gün
54-1204	4769412:	1,23 gün imalat ön süresi + 0,20 gün montaj süresi = 1,43 gün

4770056, 5090119, 98435129, 4769592, 5090120 ve 4769412 resim numaralı parçalar için kanban sayısı;

$$N \equiv \frac{(65 \text{ ortalama günlük talep}) \times (1,43 \text{ gün toplam döngü süresi}) \times (1 + 0.05)}{18}$$
$$= 5,42 \approx 6 \text{ kutu,}$$

98459486 ve 4772693 resim numaralı parçalar için kanban sayısı;

$$N \equiv \frac{(42 \text{ ortalama günlük talep}) \times (1,36 \text{ gün toplam döngü süresi}) \times (1 + 0.05)}{10}$$
$$= 6 \text{ Kutu,}$$

98459487, 4812932, 4809524 ve 4600363 resim numaralı parçalar için kanban sayısı;

$$N \equiv \frac{(24 \text{ ortalama günlük talep}) \times (1,30 \text{ gün toplam döngü süresi}) \times (1 + 0.05)}{6}$$
$$= 5,46 \approx 6 \text{ kutu}$$

olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama göre 10. Hücrede her parça tipi için 6 kanban kartı kullanılması yeterli olacaktır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada bir traktör fabrikasının mevcut yerleşim planı çizilmiş, fabrikadaki tüm parçalar ele alınmış ve hücresele imalatın uygulanması ile yeni bir yerleşim planı oluşturulmuştur. Ayrıca hücreler ve montaj hatları arasındaki parça transferlerinin idaresi kanbanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Hücresele imalatın en önemli faydası parçaların kat ettiği mesafelerin azalması ile taşıma süreleri ve taşıma ve üretim maliyetlerinin azaltılmasıdır. Uygulamanın sağlayacağı fayda rakamsal olarak çalışmada ifade edilmiştir. Ayrıca uygulama ile daha az sayıda parça daha hızlı üretilerek fabrika içerisindeki karmaşıklık en alt düzeye indirilebilecektir. Fabrikada oluşturulacak kanban sisteminin önemli bir avantajı da görsel denetimi sağlamasıdır. Kanban sistemi sayesinde üretim sahasında sadece dolaşarak kanban panolarına bakarak işi denetlemek mümkündür. Örneğin, kartlardaki birikme üretimdeki yavaşlamayı, azalma ise üretimdeki hızlanmayı göstermektedir.

Fabrika bu çalışmada temelleri atılan hücresele üretimi uygulamaya istekli görülmektedir. Ancak fabrika da hücresele üretime geçmeden önce hazırlık olarak, makina hazırlık sürelerinin kısaltılması yapılmalıdır. Hazırlık sürelerinin azaltılması parti büyüklüklerinin ve dolayısıyla kanban sayılarının azalmasını sağlar. Bu da çalışma

da hesaplanan faydanın da ötesinde süre ve maliyet azalmasına ve fabrikanın üretim yapılan alanın azaltılmasına yol açar.

A CELLULAR MANUFACTURING APPLICATION IN A TRACTOR FACTORY

In this study, it is shown how to apply cellular production in a Turkish tractor company based in Ankara, Turkey. As a first step in the application, Production Flow Analysis (PFA) is applied to obtain machine cells. PFA is a simple approach and obtains the part families and machine cells simultaneously. Later, the overall and in-cell layouts are obtained and a kanban pull system is developed to control the flow of parts among the assembly line and machine cells in the factory. The comparison of the previous situation and the new proposed cellular production shows that there is around 70% reduction in material handling cost and total distance travelled.

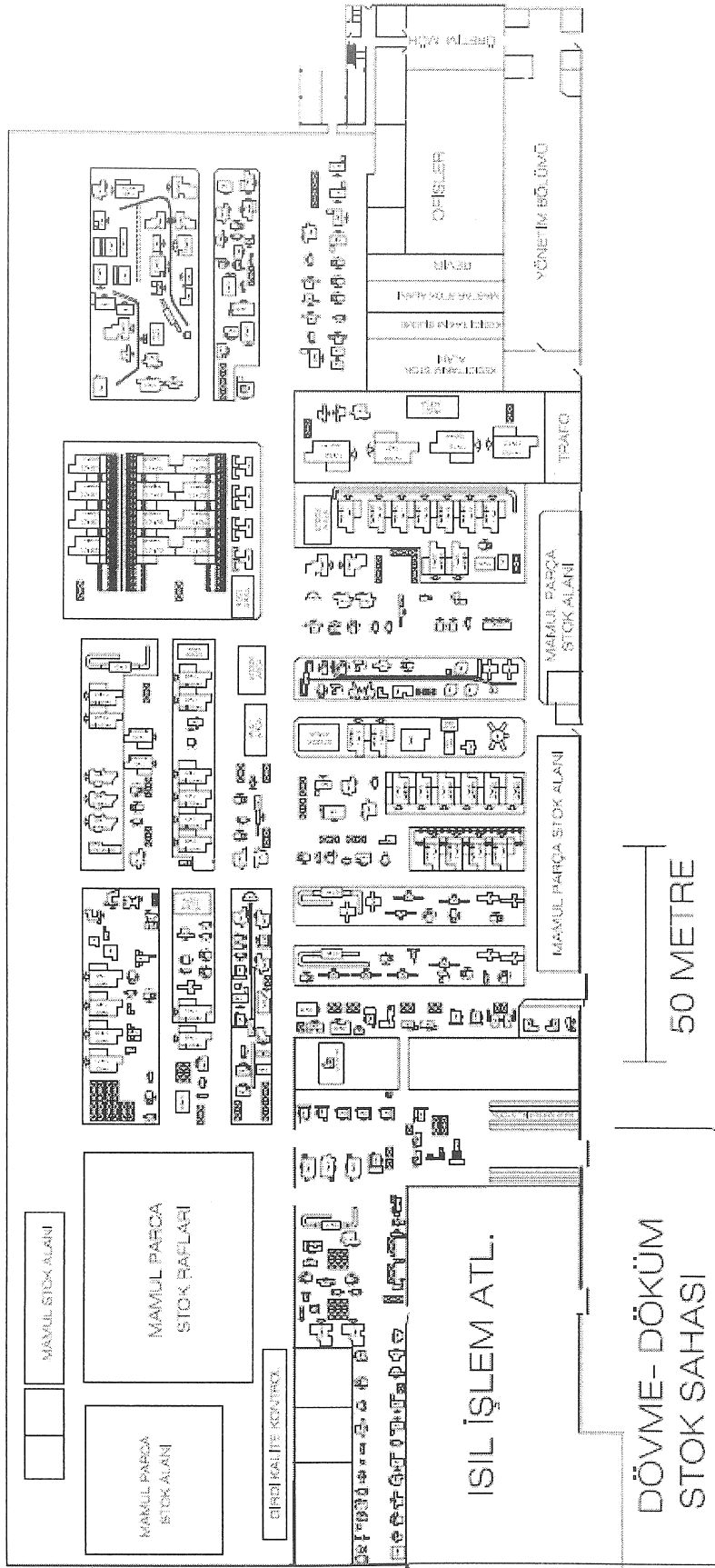
Keywords: Cellular Manufacturing, Cellular Layout, Plant Layout, Kanban.

KAYNAKÇA

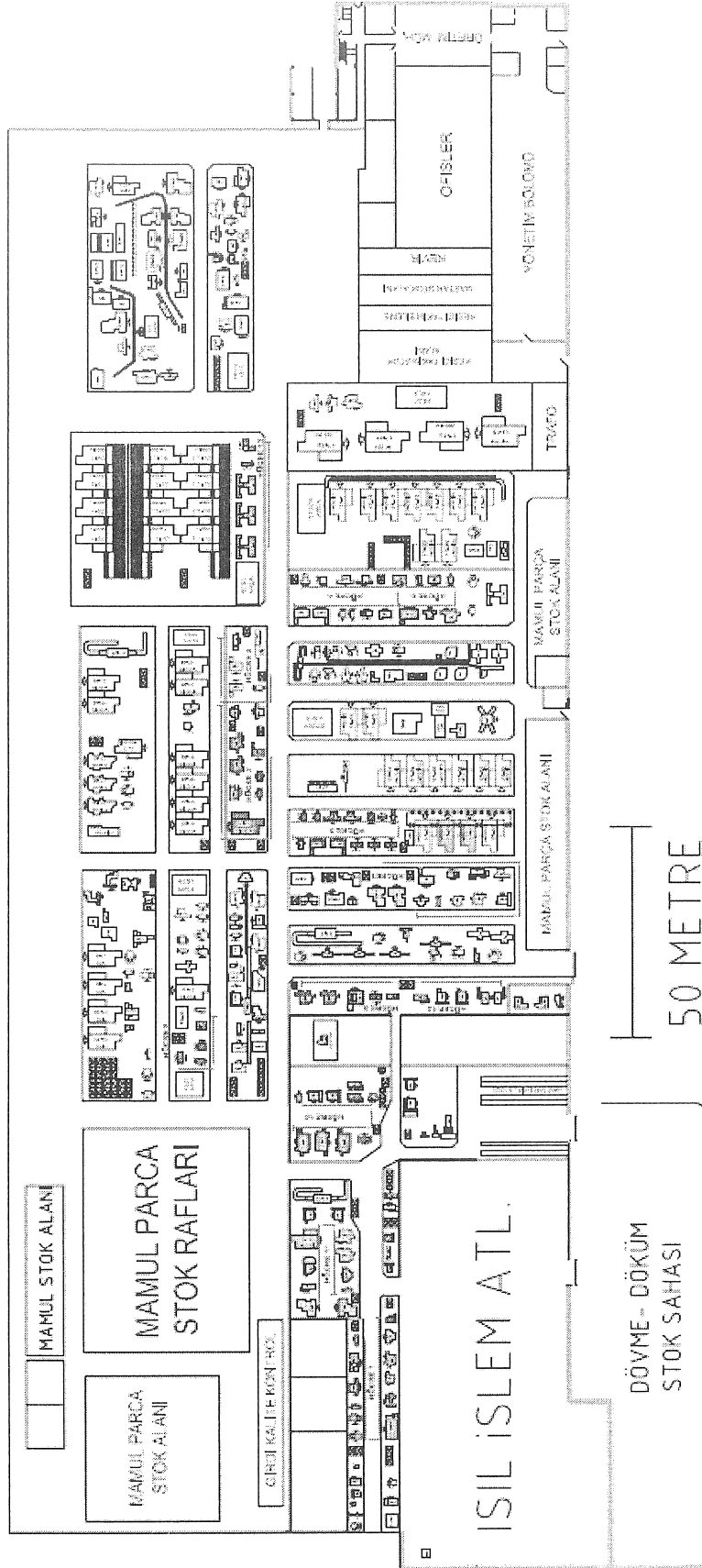
1. Askın, R. G. ve Zhou, M., Formation of Independent Flow-Line Cells Based on Operation Requirement and Machine Capabilities, *IIE Transactions*, 30 (1998), 319-329.
2. Chaneski, W. S., Cellular Manufacturing Can Help You, *Modern Machine Shop*, 71(1998), 52-53.
3. Olexa, R., When Cells Makes Sense, *Manufacturing Engineering*, 128 (2002), 45-51.
4. Krajewski, Lee J., *Operations Management Strategy and Analysis*, Prentice-Hall International Inc., 6nd ed., New York., 799-810, 2002.
5. Groover, M.P., *Automation Production Systems and Computer Integrated Manufacturing*, Prentice-Hall International Inc., 2nd ed., New York., 420-453, 2001.
6. Lockyer, K., *Production and Operations Management*, Pitman Publishing, 5nd ed., London, 45-55, 1988.
7. Baran, J. J., Tips on Tackling GT Based Cells, *Manufacturing Engineering*, 106 (1991), 46-49.
8. Burbidge J.L., Change to Group Technology: Process Organization is Obsolete, *International Journal of Production Research*, 30 (1992), 1209-1219.
9. Güçlü, K.G., *Türk Traktör Fabrikasında Makina Yerleşiminde Hücresele İmalat Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2006.

10. Meyers, F.E., Stephens M.P., *Manufacturing Facilities Design and Material Handling*, Prentice-Hall International Inc., 2nd ed.", New York., 56-63, 2000.
11. Slack, N., *Operations Management*, Pitman Publishing, London, 861, 1998.
12. Louis, Raymond S., *Integrating Kanban with MRP II*, Productivity Pres, New York., 21- 41, 20

Ek-1. Mevcut yerleşim planı.



Ek-2. Yeni tasarlanan yerleşim planı.



YAYIN İLKELERİ

Amaç

1. Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmaları duyurmak.
2. Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
3. Yayımlanan çalışmalar üzerinde teknik tartışma ortamı yaratmak.
4. Üniversite – endüstri arasındaki yakınlaşma ve işbirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.
5. Türkçe teknik bilgi birikimini arttırmak.

Kapsam

- (a) Dergi amaçları doğrultusunda aşağıda belirtilen konularda veya bunlara yakın konulardaki yazıları yayımlar;

Makina Tasarımı, Mekanik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi, Makina Teorisi ve Mekanizma Tekniği, Makina Elemanları, İmalat Yöntemleri, Bilgisayar Yardımı ile tasarım ve İmalat, Robotik ve Esnek İmalat Yöntemleri, Akışkanlar Mekaniği, Malzeme Seçimi ve Malzeme Sorunları, Kalite Kontrolü, Fabrika Organizasyonu ve Üretim Planlaması, Bakım ve Onarım, Derginin amacına uygun diğer konular.

- (b) Dergide yayımlanacak makaleler, bir yeniliği, ilerlemeyi, gelişmeyi, araştırma ya da uygulama sonuçlarını içermek üzere araştırma makaleleri, uygulama makaleleri, derleme makaleleri, çeviri makaleleri ve kısa makaleler olabilir.
- (c) Dergide üyelerimize faydalı olabilecek imalat ve teknoloji ile ilgili araştırma ve çalışmaların sunulduğu veya firma ve kuruluşların tanıtıldığı yazılar yayımlanabilir.

- (d) Derginin kapsamına giren konularda düzenlenen yurtiçi ve yurtdışı konferans, seminer, vb. etkinliklere ve ayrıca bu konulardaki kitap, dergi vb. yayınlara ait duyurular yer alır.

Makalelerin Değerlendirilmesi

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, yayın kalitesi olarak belirli bir düzeyin üstünde kalmayı amaçlamıştır. Türkiye koşullarını da gözönüne alarak, bu kalite düzeyinin sürdürülmesi için gerekli tüm çaba ve titizlik gösterilecektir. Dergi'ye gelen her makale kesinlikle incelemeden geçirilecek ve bu amaçla mümkün olduğu kadar Türkiye çapında ya da yurtdışında konunun uzmanı hakemler tarafından değerlendirilmesine özen gösterilecektir. İnceleme ve değerlendirme sonuçları hakkında makale yazarlarına bilgi verilecektir.

YAYIN HAKKI

Dergide yayımlanan makalelerin her türlü yayın hakkı Makina Tasarım ve İmalat Derneği'ne aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayımlanamaz ve çoğaltılamaz.

ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, MAKİNA TASARIM VE İMALAT (MATİM) DERNEĞİ'dir.

"Dergi Yayın Kurulu" dergi yönetimi ile ilgili organdır. Dergi Yayın Kurulu, MATİM Derneği Yönetim Kurulu tarafından bir yıl süre ile seçilir. Yayın Kurulu derginin yayın ilkelerine uygun yayımı ile yükümlüdür. Yayın Kurulu faaliyetleri konusunda MATİM Derneği Yönetim Kuruluna bilgi verir ve onayını alır.

Journal of MECHANICAL DESIGN AND PRODUCTION

Journal of Mechanical Design and Production is a periodical, published by the Turkish Mechanical Design and Production Society, METU, Ankara, Turkey. It is one of the society's aims, to publish qualified research and review papers in Turkish. The published papers are strictly refereed to maintain a high scientific and engineering level at international standard.

MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi'ne yurt içinden ya da yurt dışından isteyen herkes yayımlanmak üzere makale gönderebilir. Gönderilen makalelerin dergi temel amaçlarına uygun ve dergi kapsamı içinde olması ve aşağıdaki makale kabul ilkelerini sağlaması gerekmektedir. Dergi Yayın Kuruluna gelen her makale en az iki hakem tarafından değerlendirilir ve sonuç olumlu ya da olumsuz olsa da, yazarına bildirilir.

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayımlanabilir.

- Araştırma Makaleleri.
- Uygulama Makaleleri.
- Derleme Makaleleri: Belirli bir konu üzerinde bilimsel ve teknolojik son gelişmeleri zengin bir kaynakçaya dayanarak aktaran ve bunların değerlendirmesini yapacak nitelikte olmalıdır.
- Çeviri Makaleler: Yerli teknoloji ve bilgi birikimine önemli bir katkıda bulunacak nitelikte olmalıdır.
- Kısa Makaleler: Yapılan bir çalışmayı zaman geçirmeden duyuran veya bu dergide yayımlanan bir makaleyi tartışan yazılardır.
- Diğer: Yukarıda tanımlanan içerikte olmayan, ancak üyelerimize faydalı olabilecek, imalat ve teknoloji ile ilgili çalışma ve araştırmaların bulunduğu, firma ve kuruluşların teknik özelliklerini tanıttığı yazılardır.

Hakem değerlendirmesi için makaleler, biri orjinal olmak üzere dört basılmış kopya ile birlikte bir de elektronik kopyası Makina Tasarım ve İmalat Derneği Yayın Kurulu'na bir başvuru formu ile gönderilmelidir. Bu başvuru formu <http://www.me.metu.edu.tr/matim> sayfasından bulunabilir.

Yazarlar, yayınlanma kabulünü takiben makalenin en son halini elektronik ve bir basılmış kopya olarak göndermelidir. Elektronik kopya makalenin basılmış halinin aynısı olmalıdır. Kelime-işlemci olarak Windows işletim sisteminde çalışan MS Word program paketi kullanılmalıdır. Makalenin kaydedildiği disket/CD veya e-mail kullanılan kelime-işlemci paket programı ve sürümü belirtilerek gönderilmelidir.

MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

Yazım Dili

Kullanılan dilin olabildiğince basit, anlaşılır ve kesin olmasına özen gösterilmelidir. İleri düzeyde teknik ya da alışılmamış kavramlar kullanmak gerektiğinde, bunlar uygun bir şekilde tanımlanmalı ve yeterince açıklanmalıdır.

Makalenin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

- Makalenin adı
- Yazar(lar) ad(lar)ı, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve kuruluşun bulunduğu il.
- Özet ve anahtar kelimeler
- Makalenin ana kısmı
- Teşekkür (gerekli ise)
- İngilizce başlık, özet ve anahtar kelimeler
- Kaynakça
- Ek(ler) varsa

Makalenin adı, olabildiğince kısa, gereksiz ayrıntıdan arınmış olmalı, ancak gerekli anahtar sözcükleri içermelidir.

Yazarların ad ve soyadları, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve bulunduğu il verilmelidir. Ayrıntılı görev ve adres ise ayrı bir kağıtta ve yazarların kısa özgeçmişleri ile birlikte belirtilmelidir.

Özette sadece sonuçlar değil makalenin tümü çok kısa ve öz şekilde açıklanmalıdır. Özet, makalenin konusu, kapsamı ve sonuçları hakkında fikir verebilmeli, ilgili anahtar sözcük ve deyimleri içermelidir. 100 kelimeyi geçmeyen Türkçe özetin ve anahtar sözcüklerin İngilizcesi de konulmalı ve makale başlığının İngilizcesi de mutlaka yazılmalıdır. Bu konuda istenirse dergi Yayın Kurulu yardımcı olabilir.

Makalenin ana kısmında makalenin amacından söz edildikten sonra bir mantık zinciri içinde sorun tanımlanmalı, çözüm yolları ve diğer bilgiler verilerek sonuçlar ve bunların değerlendirilmesi sunulmalıdır.

Teşekkür kısmında gerekiyorsa kişi, kuruluş ya da firmalara teşekkür edilebilir. Özellikle firma adlarının bu bölümünün dışında başka bir yerde verilmemesine özen gösterilmelidir.

Başlıklar

Gerek makalenin yapısını belirlemek, gerekse uzun bölümlerde düzenli bir bilgi aktarımı sağlamak için üç tür başlık kullanılabilir:

- Ana Başlıklar,
- Ara Başlıklar,
- Alt Başlıklar.

Ana Başlıklar: Bunlar, sıra ile, özet, makalenin ana kısmının bölümleri, teşekkür (varsa), kaynakça, ekler (varsa)'den oluşmaktadır. Ana başlıklar büyük harflerle yazılmalıdır.

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

Alt Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harflerle yazılmalı ve hemen başlık sonunda iki nokta üstüste konularak yazıya aynı satırdan devam edilmelidir.

Matematiksel Bağıntılar

Matematiksel bağıntılar, daktilo ile veya elle anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterleri sayfanın sol tarafındaki boşlukta ayrıca ne oldukları yazı ile belirtilmelidir. Üst ve alt harf veya rakamlar belirgin bir şekilde yazılmalıdır. Özellikle daktilo kullanımında "l" (le) harfi ile "1" (bir) sayısının, "O" harfi ile "0" (sıfır) sayısının karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Metin içindeki bağıntılar 1 (bir)'den başlayarak sıra ile numaralandırılmalı ve bu numaralar eşitliğin bulunduğu satırın sağ kenarına parantez "()" içinde verilmelidir.

Şekiller, Çizelgeler ve Resimler

Şekiller, küçültme ve basımda sorun yaratmamak için siyah mürekkep ile, düzgün ve yeterli çizgi kalınlığında aydın ve beyaz bir kağıda çizilmelidir. Her şekil A4 boyutunda ayrı bir sayfada olmalıdır. Şekiller 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her şeklin altına alt yazıları birlikte yazılmalıdır. Çizelgeler de şekiller gibi, 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her çizelgenin üstüne başlığıyla birlikte yazılmalıdır.

Resimler parlak sert (yüksek kontrastlı) fotoğraf kağıdına basılmalıdır. Ayrıca şekiller için verilen kurallara uyulmalıdır. Özel koşullarda renkli resim baskısı yapılabilecektir.

Çizelge başlıklarının sadece ilk kelimesinin baş harfi büyük harfle, diğer harfleri ve kelimeler küçük harfle yazılmalıdır. Çizelge başlıkları, ayrıca bir sayfada da sıra ile verilmelidir.

Dip Notu

Dip notu gereken yerlerde bu bir üs numarası 1 ile belirtilmelidir. Buna karşılık gelen dip notu aynı sayfanın altında ara metinle bir çizgi ile ayrılmış olarak verilmelidir.

Kaynakça

Makale içinde gönderme yapılan (atıfta bulunulan) her türlü basılı yayın makalede söz edildiği sırada ve köşeli parantez [] içinde verilmelidir. Dergilerde yayımlanan makaleler, kitaplar, raporlar, tezler, kongre ve sempozyumlarda sunulan makaleler aşağıdaki örneklerde verilen şekilde yazılmalıdır.

1. Dergi Makalesi
Richie, G.S., Nonlinear Dynamic Characteristics of Finite Journal Bearings, *ASME, J. of Lub. Technology*, 105 (1983) 3, 375-376.
2. Kitap
Shigley, J.E. ve Mitchell, L.P., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.
3. Rapor
Arslan, A.V. ve Novoseletsky, L.A., *Mathematical Model to Predict the Dynamic Vertical Wheel/Rail Forces Associated with Low Rail Joint*, AAR Technical Center, Technical Report, No.R-462, October 1980.
4. Kongre Makalesi
Adalı, E. ve Tunali, F., Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş, *1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı*, 287-293, ODTÜ, 1984.

Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

Dergide yayımlanacak makaleler 13 makale sayfasını geçmemelidir. Makaleler daktilo ile A4 kağıdının tek yüzüne, iki aralıklı olarak yazılmalı ve sayfa kenarlarında yeteri kadar boşluk bırakılmalıdır. Şekillerin orjinalleri de dahil olmak üzere makale üç kopya gönderilmelidir.

Kabul edilen makaleler dergi için yapılan dizgi ve şekilsel düzenlemeden sonra kontrol için basımdan önce yazarına gönderilir.

Yayımlansın veya yayımlanmasın gönderilen makaleler yazarına geri gönderilmez. Yazılardaki fikir ve görüşler yazarına, çeviriden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.

YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarn adresine gönderilir.

1. Örnek dip notu